



Pedro André Fradique Lopes

Licenciado em Ciências de Engenharia Mecânica

Desenvolvimento de modelo semi-empírico para determinação da força de avanço e do binário em furação com brocas helicoidais

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Orientador: Professor Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira,
Professor Catedrático, Universidade Nova de Lisboa

Co-Orientadora: Professora Doutora Carla Maria Moreira
Machado, Professora Auxiliar, Universidade Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Telmo Jorge Gomes dos Santos

Arguente: Prof. Doutor Fernando Manuel Martins Cruz

Vogal: Prof. Doutor Jorge Joaquim Pamies Teixeira



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março 2016

Desenvolvimento de modelo semi-empírico para determinação da força avanço e do binário em furação com brocas helicoidais

Copyright © 2016 Pedro André Fradique Lopes, Faculdade de Ciências e Tecnologia e Universidade Nova de Lisboa

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Aos meus avós

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a todos os que me acompanharam durante a minha formação, professores, amigos e colegas, e aos que me ajudaram de alguma forma a atingir esta grande meta do meu percurso académico.

Agradeço ao Professor Jorge Pamies Teixeira pela orientação e apoio, pela partilha de conhecimentos e experiência, pela disponibilidade e sessões de esclarecimento que contribuíram para que este trabalho atingisse os elevados padrões de exigência a que se propõe.

À Professora Carla Machado queria agradecer o apoio dado durante o difícil processo de desenvolvimento do procedimento experimental, toda a ajuda prestada e disponibilidade demonstrada para a conclusão deste documento.

Um agradecimento especial ao Sr. Campos e ao Sr. Paulo pela ajuda e partilha de conhecimentos técnicos ao longo de todo o trabalho desenvolvido em laboratório que possibilitou a produção de todas as peças necessárias ao procedimento experimental.

Quero referir todos os meus amigos e colegas que acompanharam o desenvolvimento deste trabalho, em especial ao João Ferreira que foi um amigo presente ao longo de toda esta jornada, pelo incentivo e ajuda nos momentos de maior frustração.

Agradeço ao meu primo João Miguel pela importância do seu companheirismo e amizade.

Agradeço à minha família, especialmente aos meus pais por todo o apoio e crença depositados em mim, todo o esforço que esta oportunidade representa e todas as lições e exemplos importantes ao longo da minha vida. Aos meus padrinhos, primos e afilhada que sempre me apoiaram e incentivaram.

À La Salette a quem dedico este trabalho, que em muitos momentos sem a sua motivação não teria sido possível e o mais profundo agradecimento por toda a compreensão, apoio, incentivo e carinho ao longo destes anos.

A furação é um dos processos de maquinagem mais utilizados na indústria de produção de componentes, sendo no entanto um dos processos mais difíceis de descrever fisicamente devido à complexidade geométrica das brocas. Devido a estes factos e às elevadas exigências a que a indústria moderna obriga, a furação continua a ser um objeto de estudo e investigação com vista a desenvolver ferramentas, aumentar o conhecimento sobre a influência dos materiais utilizados e parâmetros de corte selecionados, com o objetivo de garantir melhorias no processo de furação, reduzindo as possibilidades de falha da ferramenta e erros de maquinagem.

Nesta dissertação pretende-se desenvolver um modelo semi-empírico para determinação de força de avanço e do binário durante a maquinagem de furos, tendo em conta a geometria das brocas, material a ser maquinado e parâmetros de corte. O modelo desenvolvido, à semelhança de alguns estudos apresentados na literatura, é composto por duas partes, que correspondem a duas zonas distintas da broca: zona da aresta transversal de corte e zona das arestas de corte. Para a zona das arestas de corte o modelo proposto é puramente matemático, na zona da aresta transversal de corte o modelo é obtido através de um método semi-empírico, os valores totais são obtidos pela soma dos valores obtidos em cada zona da broca.

A validação do modelo proposto é verificada pela comparação entre resultados de força de avanço e binário obtidos por simulação computacional com os resultados obtidos experimentalmente, e conclui-se que o modelo proposto tem um erro inferior a 5%.

Palavras-chave: Furação; Aresta Transversal de Corte; Binário; Brocas Helicoidais; Força de avanço; Aresta de Corte.

Drilling is one of the machining processes most used in industry, and is one of the most difficult to describe physically due to the geometrical complexity of the drills. Because of this and the high demands required by industry, research is very active in order to develop tools and to gain further knowledge about the influence of used materials and selected cutting parameters. This will ensure improvements to the drilling process, reducing the probability of failure of the tool and machining errors.

This thesis is intended to develop a semi-empirical model for predicting the thrust force and torque developed during machining holes taking into account the geometry of the drill, the material to be machined and cutting parameters. Similarly to some studies in the literature the developed model consists of two parts, which correspond to two distinct areas of the drill: zone of the chisel edge and zone of the main cutting edges. For the zone of the main cutting edges a purely mathematical model is proposed, in the region of the chisel edge the model is obtained by an semi-empirical method. The total values of thrust force and torque are obtained by adding up the values in each area of the drill.

The validation of the model is verified by comparison of thrust force and torque results obtained by computer simulation with experimental results, and it's concluded that the model has an error of less than 5%.

Keywords: Drill; Chisel Edge; Torque; Helical Drill Bit; Thrust Force; Main Cutting Edges.

Índice de Matérias

1	1
1.1 Enquadramento e Motivação	1
1.2 Objetivos e trabalhos realizados	1
1.3 Estrutura da Tese	2
2	3
2.1 Introdução	3
2.2 Processo de furação	3
2.3 Tipos de brocas	4
2.4 Brocas helicoidais	6
2.5 Indentação de uma aresta rígida.....	8
2.6 Estudo do processo de furação	8
2.6.1 Modelos empíricos.....	9
2.6.2 Estudos de novas geometrias das brocas.....	10
2.6.3 Modelos matemáticos para determinação da força de avanço e do binário	11
3	14
3.1 Modelo para as arestas de corte	15
3.2 Modelo para zona de indentação.....	25
3.3 Modelo para determinação da força de avanço e do binário total.....	28
4	30
4.1 Material utilizado, brocas e parâmetros de corte.....	30
4.2 Sensores para aquisição de dados	32
4.3 Equipamento utilizado e descrição dos ensaios	33
5	38
5.1 Resultados Experimentais.....	38
5.2 Validação do modelo	40

5.2.1	Zona da aresta transversal de corte.....	40
5.2.2	Zona das arestas de corte.....	45
5.3	Resultados de força de avanço total e binário total na broca	47
5.4	Avaliação da sensibilidade do modelo ao valor do diâmetro de indentação equivalente.....	48
6	52
6.1	Conclusões e contribuições	52
6.2	Sugestão para trabalhos futuros	53
	Referências bibliográficas.....	54
	Anexo A.....	56
	Anexo B	58
	Anexo C	62
	Anexo D.....	86

Índice de Figuras

Figura 2-1 – Exemplos de furação (Adaptado de [3]) – a) Furação a cheio, b) Furação com escalonada, c) Furação com rebaixo, d) Trepanação, e) Furo de ponto.	4
Figura 2-2 – Tipos de brocas: a) betão; b) metal; c) madeira.....	5
Figura 2-3 – Broca helicoidal.....	6
Figura 2-4 – Partes constituintes das brocas helicoidais [4]	6
Figura 2-5 – Ponta da broca (vista perpendicular ao eixo) [4].....	7
Figura 2-6 – Ponta da broca (vista paralela ao eixo) [4]	7
Figura 2-7 – Fenómeno de Indentação [6]	8
Figura 2-8 – Tipos de brocas estudadas por Paul, Kapoor & Devor [7]	10
Figura 2-9 – Nova geometria desenvolvida (arestas de corte curvas) [14]	11
Figura 3-1 – Diagrama da construção do modelo semi-empírico	14
Figura 3-2 – Caracterização do ponto M	15
Figura 3-3 – Representação do ângulo ω	16
Figura 3-4 – Geometria de corte na aresta de corte.....	17
Figura 3-5 – Projeção do ângulo ω no plano de corte.....	18
Figura 3-6 – Passo de hélice.....	19
Figura 3-7 – Passo de hélice antes e após afiamento	20
Figura 3-8 – Vista das forças e velocidade de corte na aresta de corte.....	21
Figura 3-9 – Diagrama de forças e círculo de Merchant.....	22
Figura 3-10 – Força elementar dF_s	23
Figura 3-11 – Relações trigonométricas da aresta de corte.....	24
Figura 3-12 – Semelhanças entre a ponta da broca e modelo proposto por Kashanov	26
Figura 3-13 – Linhas de escorregamento	26
Figura 4-1 – Brocas utilizadas (DORMER A100)	31

Figura 4-2 – Método de medição de dimensões da ponta das brocas	32
Figura 4-3 – Dinamómetro e Amplificador de Sinal Kinstler.....	33
Figura 4-4 – Módulos de Aquisição de Dados	33
Figura 4-5 – Esquematização gráfica do ensaio a cheio e com pré-furo de diâmetro igual à aresta transversal de corte.....	34
Figura 4-6 – Centro de Maquinagem	34
Figura 4-7 – Montagem Experimental dos Sensores.....	35
Figura 4-8 – Dimensões do provete e respetiva fixação no sensor de binário	36
Figura 4-9 – Montagem Experimental dos Sensores.....	37
Figura 5-1 – Resultados ensaio furo com pré-furo	38
Figura 5-2 – Resultados ensaio com furo a cheio	39
Figura 5-3 – Diâmetro de indentação vs comprimento da aresta transversal de corte	41
Figura 5-4 – Diâmetro de indentação equivalente.....	42
Figura 5-5 – Força de avanço na aresta transversal de corte.....	43
Figura 5-6 – Binário na aresta transversal de corte	44
Figura 5-7 – Força de avanço nas arestas de corte	45
Figura 5-8 – Binário nas arestas de corte	46
Figura 5-9 – Força de avanço total teórica e força de avanço total experimental	47
Figura 5-10 – Binário total teórico e binário total experimental	48
Figura 5-11 – Variação de resultados na aresta transversal de corte.....	49
Figura 5-12 – Variação dos resultados nos valores totais	50

Índice de Tabelas

Tabela 4-1 – Características dos Provetes	30
Tabela 4-2 – Parâmetros de Corte	31
Tabela 4-3 – Dimensões da ponta da broca.....	32
Tabela 5-1 – Resultados obtidos no procedimento experimental.....	39
Tabela 5-2 – Força de Avanço e Binário na Aresta Transversal de Corte	40
Tabela 5-3 – Diâmetro de Indentação	41
Tabela 5-4 – Diâmetro de indentação equivalente	42
Tabela 5-5 – Força de avanço na aresta transversal de corte.....	43
Tabela 5-6 – Binário na aresta transversal de corte.....	44
Tabela 5-7 – Força de avanço nas arestas de corte.....	45
Tabela 5-8 – Binário nas arestas de corte.....	46
Tabela 5-9 – Força de avanço e Binário total.....	47
Tabela 5-10 – Modificações à equação do diâmetro de indentação equivalente.....	48

Símbolos

α	Ângulo de avanço
β_n	Ângulo de atrito normal
γ_d	Ângulo de ataque dinâmico na zona de indentação
γ_n	Ângulo de ataque normal
γ_s	Distorção da apara
γ_r	Ângulo auxiliar
2γ	Ângulo de ponta de uma cunha rígida
δ_0	Ângulo de hélice na periferia da broca
δ	Ângulo de hélice no ponto M
θ_l	Ângulo entre linhas de escorregamento
θ_n	Ângulo auxiliar nº 1
ξ	Projeção do ângulo ω no plano de corte, Parâmetro
σ	Pressão hidrostática
σ_R	Tensão de rotura
τ_s	Tensão de corte no plano de corte
φ	Ângulo auxiliar
φ_n	Ângulo de corte normal
ψ	Ângulo da aresta da ponta da broca
ω	Ângulo auxiliar
A_{AB}	Área de corte
B_T	Binário total
B_1	Binário nas arestas de corte
B_2	Binário na aresta transversal de corte
d	Diâmetro da broca
d_i	Diâmetro de indentação
d'	Comprimento da aresta transversal de corte
d_{eq}	Diâmetro de indentação equivalente
dl	Elemento de aresta de corte
dB	Elemento de binário
dFa	Elemento de força de avanço
dFc	Elemento de força de corte

dF_R	Elemento de força normal a F_c e F_a
dF_T	Elemento de força normal à direção de corte
F_{aT}	Força de avanço total
F_{a1}	Força de avanço nas arestas de corte
F_{a2}	Força de avanço na aresta transversal de corte
F_C	Força de corte
F_F	Força de atrito na face de ataque
F_N	Força normal ao plano de corte
F_R	Força normal a F_c e F_a
F_S	Força de corte no plano de corte
F_T	Força normal à direção de corte
f	Avanço
H	Paço de hélice
h	Profundidade de penetração
i	Ângulo de inclinação
k	Tensão de corte crítica
l	Comprimento da aresta de corte
l'	Projeção do comprimento da aresta de corte no eixo horizontal
M	Ponto genérico na aresta de corte
N_f	Força normal à face de ataque
n	Coefficiente de encruamento
P	Força por unidade de comprimento
p	Metade do ângulo da ponta da broca, Pressão
R	Raio da broca, Força resultante
r	Raio do centro da broca ao ponto genérico M
t_l	Espessura da apara antes do corte
$2t$	Distância entre arestas de corte
V_C	Velocidade de corte

Siglas

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
DEMI	Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial
DAQ	Sistema de Aquisição de Dados
FCT	Faculdade de Ciências e Tecnologia

Introdução

1.1 Enquadramento e Motivação

A furação é um dos processos mais utilizados na indústria de produção de componentes, estando presente nas mais variadas áreas tais como automóvel, aeronáutica e aeroespacial, matrizes/moldes, eletrodomésticos, equipamentos médicos e eletrónicos. Estudos recentes mostram que 25% do tempo necessário para maquinar um componente é gasto em furação. Tönshoff et al. [1] referem que, dos diferentes processos usados para produzir componentes, 33% correspondem a operações de furação. Além disso, a solicitação de tolerâncias geométricas apertadas nos *designs* modernos, levam a uma necessidade de aumentar a precisão dos furos em produção, quer dimensional, quer geometricamente. Esta necessidade de melhorar a precisão e parâmetros de furação surge ainda devido ao facto de os problemas resultantes de furação de componentes poderem originar custos elevados, pois é um processo que surge muitas vezes no fim da produção dos componentes [2], em que os problemas resultantes desta operação podem levar à rejeição do produto.

Devido às razões descritas existe a contínua necessidade de melhorar a qualidade mecânica e geométrica das brocas, desenvolver novos modelos matemáticos e computacionais para auxiliar as operações de furação com vista a rentabilizar as relações custo/furo e tempo de operação/furo, para diminuir a possibilidade de falha da ferramenta e aumentar qualidade do furo maquinado.

1.2 Objetivos e trabalhos realizados

O desenvolvimento industrial exige cada vez mais conhecimento profundo dos processos de maquinagem para possibilitar a diminuição do tempo consumido por operação de maquinagem, a redução de custos por operação, a melhoria da qualidade superficial obtida e garantir a obtenção de tolerâncias mais apertadas.

Como já foi referido anteriormente, a furação ocupa um lugar de grande relevância na indústria atual, pois é um dos processos a que mais se recorre durante a maquinagem de peças, o que se reflete num elevado consumo de tempo de fabrico e, consequentemente, de capital. As melhorias

deste processo garantem vários benefícios à indústria, desde a redução de tempo de furação bem como a redução na quantidade de furos rejeitados.

Ao prever a força de avanço e o binário, é possível otimizar os parâmetros de processo de forma a garantir uma melhoria na qualidade do furo, redução de custos e redução da probabilidade de falha da ferramenta bem como um aumento significativo do tempo de vida útil da mesma.

O objetivo principal desta dissertação é o desenvolvimento de um modelo semi-empírico que consiga prever a força de avanço e o binário no processo de furação com brocas helicoidais.

Com o intuito de cumprir os objetivos traçados, realizou-se a revisão da literatura sobre os modelos já existentes e realizou-se o planeamento dos ensaios experimentais para validação do modelo proposto.

1.3 Estrutura da Tese

Esta dissertação encontra-se dividida em seis partes com os conteúdos abaixo indicados:

Capítulo 1: Neste capítulo apresenta-se o enquadramento do tema e a motivação que origina este trabalho. Procede-se à definição do objetivo principal e a apresenta-se a estrutura da dissertação.

Capítulo 2: Apresenta-se a revisão do estado da arte que incide sobre as matérias revelantes para este trabalho, nomeadamente o processo de furação, os diferentes tipos de brocas existentes, as características das brocas helicoidais e a indentação de uma aresta rígida.

Capítulo 3: São definidas a metodologias, a partir do estado da arte, que vão possibilitar o desenvolvimento dos modelos teóricos para previsão de força de avanço e binário nas brocas helicoidais convencionais.

Capítulo 4: Procedimento experimental, onde se descreve o método para se obter a força de avanço e binário, nas arestas de corte e na aresta transversal de corte. Apresentação do equipamento e instrumentação utilizados para fazer as medições.

Capítulo 5: Apresentação e discussão dos resultados obtidos experimentalmente.

Capítulo 6: Conclusões relativas ao procedimento experimental e sugestões de trabalhos futuros.

Revisão do estado da arte

2.1 Introdução

Neste capítulo será descrito o conjunto de conceitos e de modelos teóricos já existentes que servem de base para o trabalho conducente a esta dissertação. Resumidamente, o capítulo será dividido em vários subcapítulos que são: processo de furação, tipos de brocas, brocas helicoidais, fenómeno de indentação, métodos de investigação mais usuais e por último modelação matemática para previsão de força de avanço e binário.

2.2 Processo de furação

A furação é definida como um processo de maquinagem destinado à obtenção de furos cilíndricos numa peça com auxílio de uma ferramenta, em geral multicortante, onde o movimento de avanço é realizado segundo uma diretriz retilínea que coincide com o eixo de rotação [3].

A furação pode ser classificada de acordo com o tipo de furo que se pretende obter:

Furação a cheio (Figura 2-1 a): neste tipo de processo o furo é obtido através da remoção de todo o volume de material contido no furo. Com este tipo de operação podem realizar-se furos passantes ou cegos.

Furação escalonada (Figura 2-1 b): habitualmente usada para se obter furos de maiores diâmetros (superiores a 8mm), e pode ser obtido por dois métodos diferentes, pré furo com uma broca de menor diâmetro ou utilização de brocas especiais com dois diâmetros diferentes;

Furação com rebaixo (Figura 2-1 c): processo onde no mesmo furo se observa dois diâmetros diferentes, o diâmetro menor é passante e o diâmetro maior é feito até uma determinada profundidade.

Trepanação (Figura 2-1d): processo de furação que utiliza brocas especiais de trepanação, onde apenas uma parte do material é removido permanecendo um núcleo de material maciço;

Furo de ponto (Figura 2-1e): este tipo de furo é feito com brocas de ponto e destina-se a obter um furo de geometria cônica de profundidade reduzida, que servirá de guia ou apoio a maquinagem feita posteriormente.

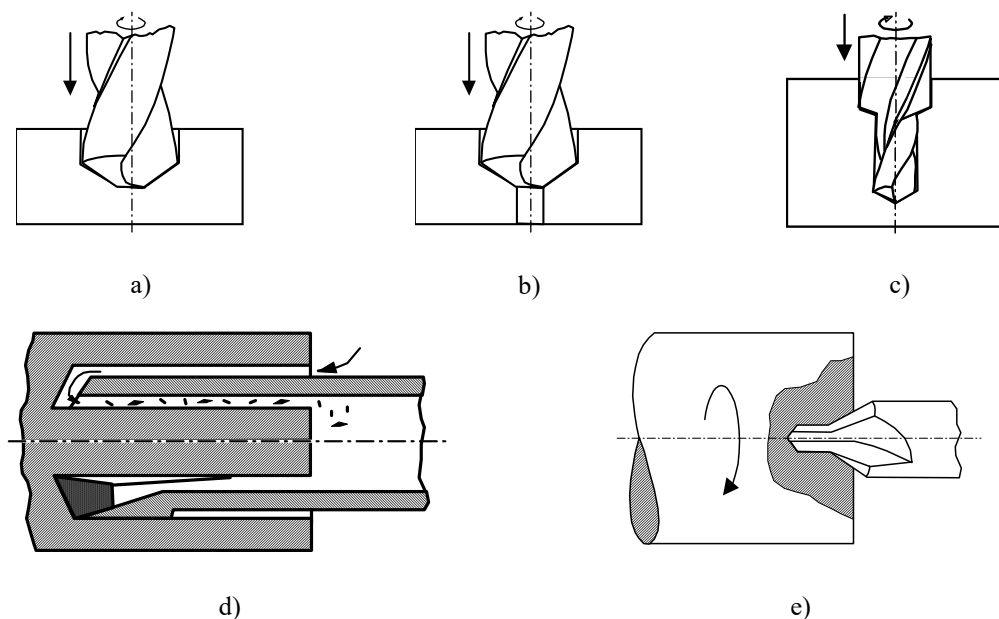


Figura 2-1 – Exemplos de furação (Adaptado de [3]) – a) Furação a cheio, b) Furação com escalonada, c) Furação com rebaixo, d) Trepanação, e) Furo de ponto.

A qualidade do furo obtido está relacionada com vários fatores e métodos de operação. Segundo o manual técnico da DORMER [4] deve-se ter especial atenção a vários pontos entre eles: seleção da broca mediante o material a ser maquinado, método de fixação que não permita escorregamentos ou movimentação da broca e remoção das aparas do interior dos furos.

Para esta dissertação, no decorrer da experimentação ir-se-á utilizar a furação a cheio e furação com pré-furo, como será descrito mais frente no capítulo respeitante ao Procedimento Experimental.

2.3 Tipos de brocas

A qualidade do furo obtido depende, em grande parte, da geometria da broca utilizada.

A seleção da broca adequada deve ter em consideração os seguintes fatores [4]:

Material a ser furado;

Profundidade do furo;

Capacidade da máquina;

Fluido refrigerante;
Condições da máquina;
Exigências de produtividade;
Escolha do porta-ferramentas;
Estabilidade da fixação da peça de trabalho;
Furação horizontal ou vertical;
Broca estacionária ou giratória;
Controle da apara;
Exigência para a dimensão do furo.

A geometria da broca selecionada deve ter em atenção, em primeira instância, o tipo de material que vai ser maquinado, devido ao facto de existirem geometrias específicas que permitem um melhor desempenho em função do material, na Figura 2-2 podemos ver as geometrias mais convencionais em função do material a maquinar.



Figura 2-2 – Tipos de brocas: a) betão; b) metal; c) madeira

Relativamente à maquinagem de metais, a necessidade de trabalhar materiais de maior dureza levou ao desenvolvimento de novas geometrias para as pontas das brocas e para os canais de escoamento de apara, utilização de novos materiais para construção das ferramentas, por exemplo em metal duro, e a incorporação de novos elementos as brocas como é o caso dos canais internos das brocas auto refrigeradas. Mais recentemente, o próprio conceito da broca como sendo uma ferramenta única com determinadas características para maquinar um grupo restrito de materiais sofre alterações com o aparecimento das brocas de pastilhas amovíveis. Este tipo de brocas possui a

característica de ter uma gama de aplicações mais vasta, devido à variedade de pastilhas de corte existentes no mercado.

Considerando que grande parte da indústria continua a trabalhar com aços de média dureza, economicamente a seleção mais vantajosa para as empresas recai sobre as brocas helicoidais de aço rápido com geometria de ponta cônica, justificado a seleção deste tipo de broca a estudar nesta dissertação.

A geometria da ponta da ferramenta é um elemento chave para se determinar duas características elementares do desempenho das brocas, nomeadamente a força de avanço e o binário [5], sendo este o facto que leva a que se continue a desenvolver investigação para prever estas duas grandezas durante a furação.

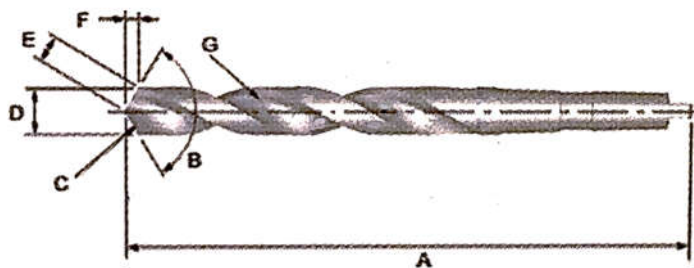
2.4 Brocas helicoidais

Numa descrição simplista as brocas helicoidais consistem num corpo cilíndrico, em que uma parte é percorrida pelos canais de escoamento de apara numa trajetória elíptica em torno do eixo da broca, e uma zona de corte que se pode afiar com vários ângulos de ponta mediante o material a ser furado. As brocas mais comuns possuem duas arestas de corte, Figura 2-3, no entanto podem ser produzidas três ou com mais, estas são a componente ativa do corte.



Figura 2-3 – Broca helicoidal

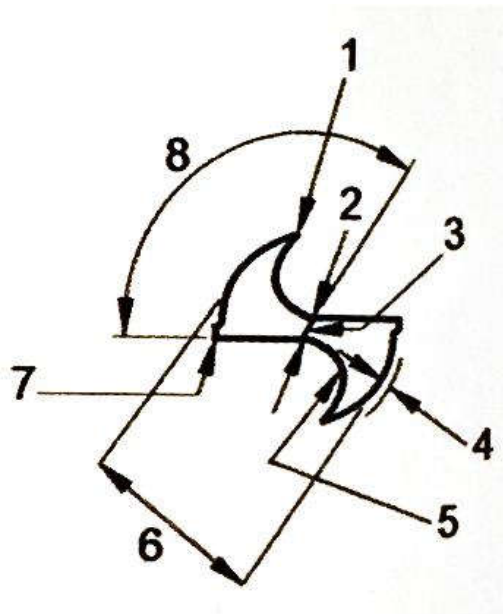
Na Figura 2-4 [4] podemos observar ao pormenor uma broca helicoidal e suas partes constituintes que serão mencionadas nesta dissertação:



- A – Comprimento total
- B – Ângulo da ponta, 2ϕ
- C – Aresta de corte
- D – Diâmetro da broca
- E – Comprimento da aresta de corte, l
- F – Ponta
- G – Canal de escoamento de apara

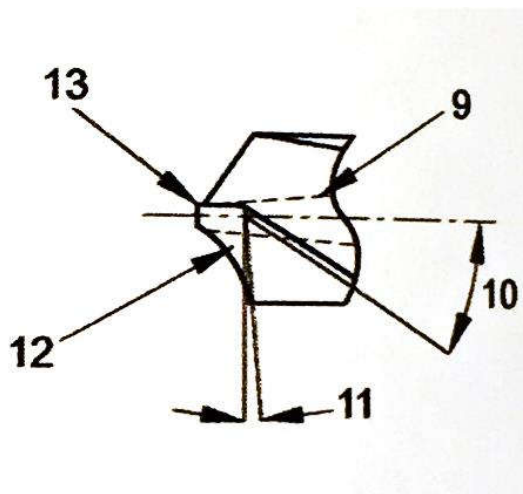
Figura 2-4 – Partes constituintes das brocas helicoidais [4]

Além das partes que compõe a broca acima descritas, o desempenho das brocas helicoidais dependem muito da geometria da ponta, na Figura 2-5 e na Figura 2-6 podemos observar os elementos que a compõe:



1. Quina
2. Comprimento da aresta transversal de corte, d'
3. Aresta transversal de corte
4. Profundidade
5. Canal
6. Diâmetro da superfície lateral de folga
7. Guia
8. Ângulo da aresta transversal de corte, ψ

Figura 2-5 – Ponta da broca (vista perpendicular ao eixo) [4]



9. Espessura do núcleo
10. Ângulo de hélice na periferia, δ_0
11. Ângulo lateral de folga
12. Flanco
13. Aresta transversal de corte da guia

Figura 2-6 – Ponta da broca (vista paralela ao eixo) [4]

2.5 Indentação de uma aresta rígida

Kashanov [6] apresenta uma formulação teórica que descreve o fenómeno de indentação de uma cunha rígida, não deformável e simétrica, numa superfície plana de um corpo rígido perfeitamente plástico.

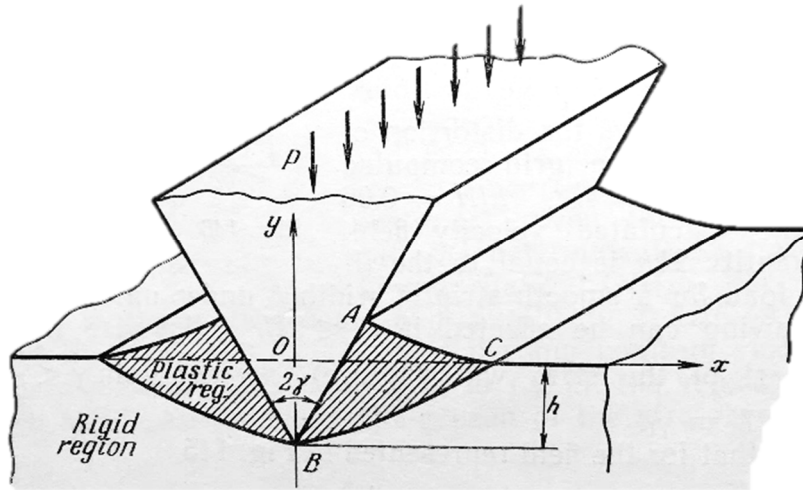


Figura 2-7 – Fenómeno de Indentação [6]

Neste fenómeno, verifica-se que à medida que a cunha é forçada a penetrar o material, este deforma plasticamente e é forçado a deslocar-se pelos dois lados da aresta, como se pode ver na Figura 2-7.

Devido às semelhanças geométricas entre a cunha e a ponta das brocas na zona da aresta transversal, são vários os autores [7–11] que utilizam este modelo para descrever o fenómeno ocorrido na fase inicial da penetração da broca, em que não ocorre corte por arranque de aparas. Denomina-se a zona da broca, situada numa circunferência imaginária de raio igual ao comprimento da aresta transversal de corte, por zona de indentação.

Este será o modelo utilizado para quantificar a força de avanço e binário desenvolvido na zona da aresta transversal de corte.

2.6 Estudo do processo de furação

Na investigação do processo de furação sob o ponto de vista de arranque da aparas, destacam-se os modelos empíricos, estudo e desenvolvimento de novas geometrias para a ponta da ferramenta e os modelos matemáticos para obter equações mais precisas no que diz respeito a previsão de força de avanço e de binário desenvolvidos durante este processo de maquinagem.

2.6.1 Modelos empíricos

Muitos autores recorrem unicamente à experimentação para obter dados relativos ao processo de furação, podendo então designar estes estudos como sendo empíricos. Os objetivos destes estudos concentram-se maioritariamente na obtenção de determinados coeficientes e relaciona-los com os parâmetros de corte utilizados.

Gong, Lin & Ehman [10-11] apresentam um estudo dividido em duas partes, em que o principal objetivo é desenvolver um modelo que permitisse realizar simulações teóricas e numéricas dos fenómenos que ocorrem durante as primeiras fases de penetração das brocas que por sua vez têm uma grande influência na geometria e tolerância dos furos maquinados. Na primeira parte apresentam os modelos das forças envolvidas na furação e na segunda parte os modelos de comportamento dinâmico das ferramentas onde se tem em conta defeitos das brocas, de flexão da broca e modelos de espessura da apara. A partir da combinação destes modelos é possível prever o comportamento da broca nos instantes da penetração inicial e a forma do furo maquinado. Os autores concluem ainda, através de resultados experimentais, que os modelos apresentados são suficientemente aproximados.

Pirtini & Lazoglu [12] propuseram um novo modelo baseado nos fenómenos mecânicos e dinâmicos da furação para prever as forças de corte e a qualidade dos furos obtidos. Para tal desenvolveram um método para obter coeficientes diretamente de uma série de testes de calibração. Este modelo permite simular as forças de corte numa gama variada de condições de corte durante o planeamento do trabalho a realizar. Além de permitir prever as forças desenvolvidas durante a furação, este modelo permite a determinação e visualização 3D do perfil dos furos e selecionar adequadamente os parâmetros mediante as restrições e tolerâncias de projeto. Os resultados obtidos por este modelo são comparados com valores medidos por dinamómetro e máquina de medição de coordenadas e concluem que existe uma boa concordância de resultados.

Os autores Blăjină, Aurelian Vlase & Bogdan Vlase [13] apresentam um conjunto de dados experimentais respetivos à furação do aço inoxidável X2CrNiMo e os métodos para determinar a força de avanço e binário em condições de trabalho específicas. A grande contribuição destes autores são os resultados experimentais, visto que o modelo de cálculo utilizado é baseado em modelos apresentados na literatura com ligeiras alterações. Referem que existe necessidade de se modificar a estrutura de cálculo dos modelos da literatura, mais concretamente propõem que a velocidade da ferramenta deve ser incluída nestes modelos empíricos. Assim os autores concluem que o modelo que apresentam tendo em conta a velocidade da ferramenta possui uma boa precisão.

2.6.2 Estudos de novas geometrias das brocas

No que diz respeito ao desenvolvimento de novas geometrias das brocas pode-se subdividir os estudos em duas áreas: brocas de ponta cônica convencionais e geometrias desenvolvidas para reduzir as solicitações a que as ferramentas ficam sujeitas.

Os estudos desenvolvidos neste âmbito possuem a particularidade de se concentrarem nos métodos de afiamento das brocas, para isso desenvolvem novas geometrias para as pontas da ferramenta e avaliam qual o impacto que estas alterações têm na força de avanço e binário durante o processo de furação.

Paul, Kapoor & DeVor [7] publicaram um estudo que incide em três tipos de afiamento de brocas específicos, as brocas helicoidais de ponta cônica convencionais, brocas Racon® cuja ponta apresenta um perfil elíptico e brocas helicoidais cuja ponta da broca apresenta um perfil hiperboloidal, na Figura 2-8 podemos observar os três tipos de brocas estudadas.

Com esta formulação matemática, os autores conseguem uma previsão com um erro de precisão de 5% para a força de avanço e 10% - 12% para o binário.

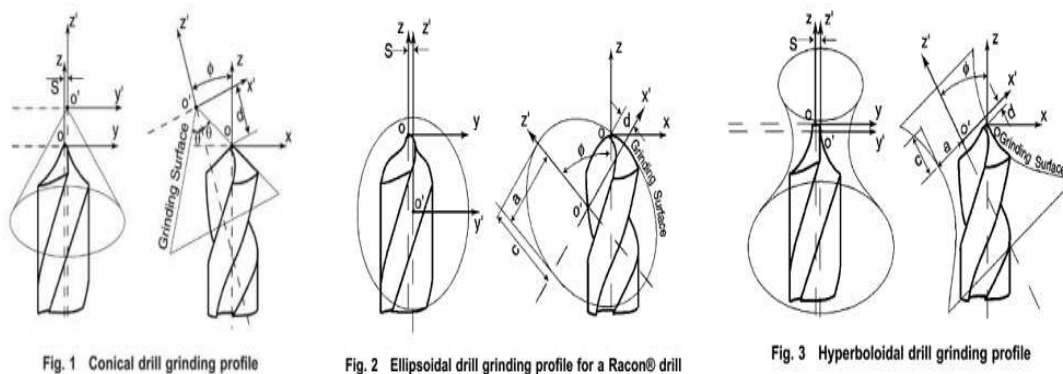


Figura 2-8 – Tipos de brocas estudadas por Paul, Kapoor & Devor [7]

Outra vertente que se verifica neste tipo de estudo é a procura de melhorias das pontas das brocas para casos concretos de furação é exemplo disso o estudo de Lin, Kang & Ehman [14] que se concentra em desenvolver uma nova geometria para micro-brocas com o intuito de avaliar as desvantagens das micro-brocas de ponta planas, que têm como maior desvantagem a baixa distribuição do ângulo de folga.

Os autores desenvolvem um modelo matemático de modo a obterem parâmetros de afiamento das brocas com arestas de corte curvas, como se pode ver na Figura 2-9, assim concluem

que esta nova geometria resolve os problemas das brocas planas e também que este tipo de geometria deve ser usado nas brocas de diâmetros maiores.

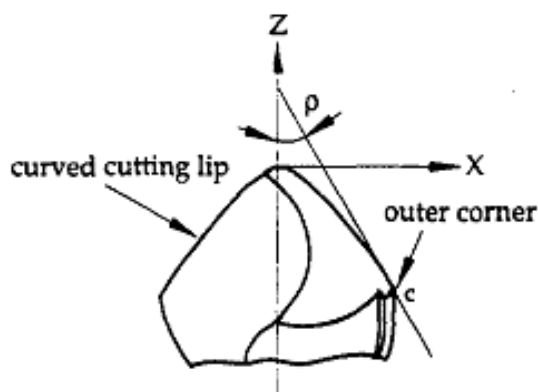


Figura 2-9 – Nova geometria desenvolvida (arestas de corte curvas) [14]

2.6.3 Modelos matemáticos para determinação da força de avanço e do binário

Uma das linhas de investigação que mais se destaca é o estudo para obtenção de equações que consigam descrever e prever com maior exatidão as solicitações a que as ferramentas ficam sujeitas durante o processo de furação.

É importante referir que no campo do estudo da furação grande parte das investigações desenvolvidas propõe-se a descrever a força de avanço e o binário em duas zonas distintas da ponta da broca: a aresta transversal de corte e as arestas de corte.

Esta diferenciação deve-se ao facto dos diferentes fenómenos físicos e mecânicos que ocorrem nestas zonas. Na aresta transversal de corte muitos autores consideram que teoricamente ocorre unicamente indentação enquanto nas arestas de corte temos corte oblíquo.

Apesar da discrição simplista feita acima, são vários os fatores que permitem atingir formulações distintas, contudo igualmente complexas.

A. Makhcha, A.R. Thangaraj & John W. Suthertland [15] apresentam um estudo que tem por objetivo aperfeiçoar um modelo matemático já estabelecido, de modo a que este seja aplicável a uma gama mais vasta de diâmetros de brocas e de materiais a maquinar. Com o intuito de avaliar o

desempenho das melhorias do modelo desenvolveram um conjunto de testes experimentais onde se utiliza dois tipos de brocas e dois tipos diferentes de materiais para diferentes condições de corte. O modelo apresenta previsões de força de avanço e binário com erros na gama dos 10%.

Em 1957 Galloway [16] publica um estudo exaustivo sobre a influência que os vários fatores podem ter no processo de furação, sendo o seu objetivo, não só obter melhorias na performance das ferramentas, mas também obter um modelo para conseguir melhores previsões do desempenho das brocas. Respetivamente à geometria das brocas, dá-se especial atenção ao ângulo de folga, ângulo de ponta da ferramenta e comprimento da aresta de corte. Avaliam-se as vibrações auto regenerativas na furação de modo a explicar erros de precisão e os defeitos geométricos nos furos maquinados.

Elhachimi, Torbaty & Joyot [17-18] descrevem um modelo teórico para previsão de força de avanço e do binário para furação de alta velocidade, modelo que consiste na determinação as distribuições de força de avanço e binário ao longo das arestas de corte e na aresta transversal de corte. Para o cálculo destas contribuições na zona das arestas de corte utilizam o modelo de corte oblíquo e na zona da aresta de corte o modelo de corte ortogonal. O modelo proposto é definido em termos das propriedades geométricas das brocas, das condições de corte e do material a ser maquinado. Este modelo permite analisar a influência da geometria da broca na força de avanço e do binário. Através de experimentação, os autores concluem que o modelo conseguem boas aproximações entre os resultados teóricos e os resultados experimentais.

Embora o modelo apresentado para descrever a força de avanço e binário seja referido para furação de alta velocidade, está de acordo com o modelo de corte oblíquo que por sua vez é valido para a maquinagem convencional, assim basear-nos-emos neste modelo no decurso do trabalho.

Desenvolvimento do modelo

Neste capítulo para brocas helicoidais de ponta cônica, almejado nesta dissertação, será arquitetado o modelo semi-empírico.

À semelhança do estudo desenvolvido por Elhachimi, Torbaty & Joyot [17 - 18], o modelo final será composto por dois submodelos desenvolvidos para duas zonas distintas: zona da aresta transversal de corte e zona das arestas de corte. A representação simplificada da construção do modelo pode ser observada no diagrama representado na Figura 3-1.

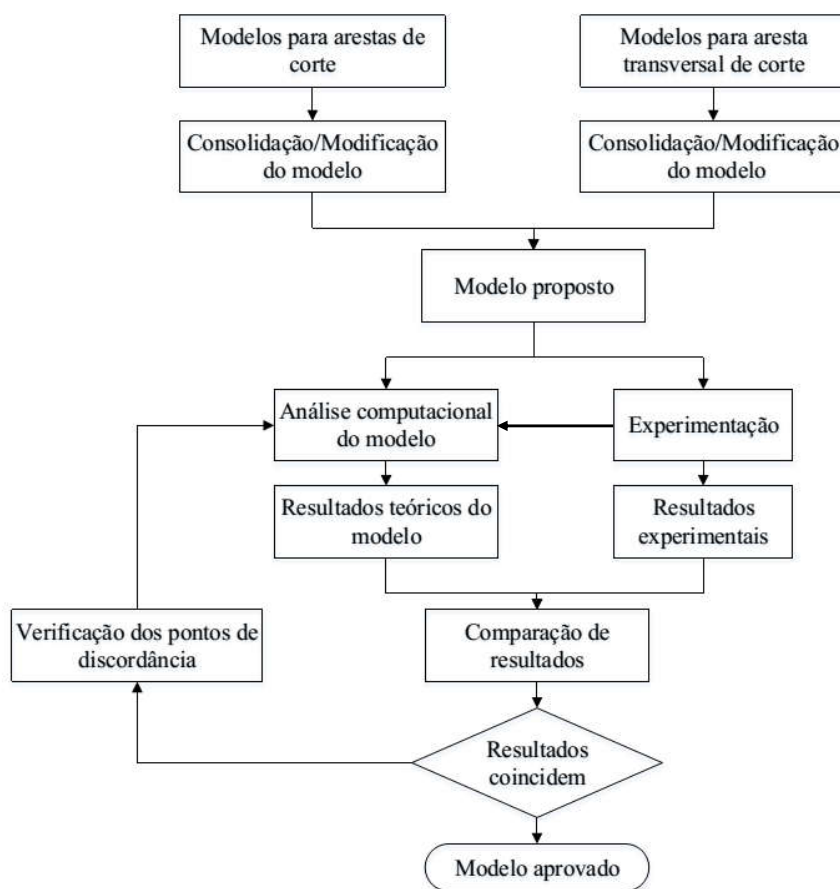


Figura 3-1 – Diagrama da construção do modelo semi-empírico

O modelo que serve de base para determinar de força de avanço e binário a que as brocas ficam sujeitas durante o processo de furação pode ser expresso pelas equações (3-1) e (3-2), onde a força de avanço e binário totais são iguais ao somatório das contribuições em cada uma das zonas da ponta da broca que serão descritas neste capítulo.

$$F_{aT} = F_{a1} + F_{a2} \quad (3-1)$$

$$B_T = B_1 + B_2 \quad (3-2)$$

A força de avanço F_{a1} e o binário B_1 são respetivos à aresta de corte e a força de avanço F_{a2} e o binário B_2 são respetivos aresta transversal de corte.

3.1 Modelo para as arestas de corte

- **Princípio do modelo**

O modelo proposto baseia-se no modelo apresentado por vários autores [17]. Como a geometria da broca ao longo da aresta de corte não é linear, o cálculo da força de avanço e do binário nas arestas de corte consiste em determinar de força de avanço dF_a e de binário dB para um elemento de comprimento dl da aresta de corte num ponto arbitrário M .

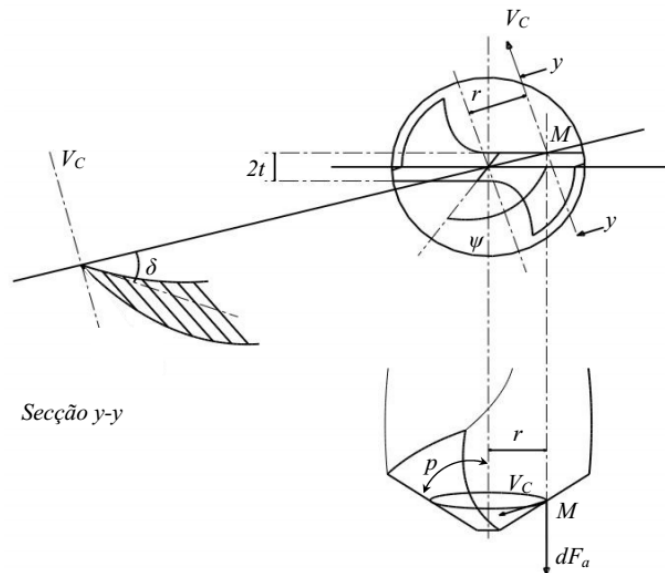


Figura 3-2 – Caraterização do ponto M

Na Figura 3-2 pode-se observar as direções da velocidade de corte, V_c , e do elemento de força de avanço, dFa , num ponto genérico M situado a uma distância r do eixo da broca. Os ângulos p , δ e ψ são respectivamente metade do ângulo da ponta da broca, ao ângulo de hélice no ponto M e o ângulo da aresta transversal de corte.

A Figura 3-3 mostra a existência uma relação geométrica, ângulo ω , que determina a posição do ponto M relativamente à distância a que se encontra do eixo da broca, no plano paralelo à aresta transversal de corte que passa por M , onde $2t$ é a distância entre arestas de corte nesse plano.

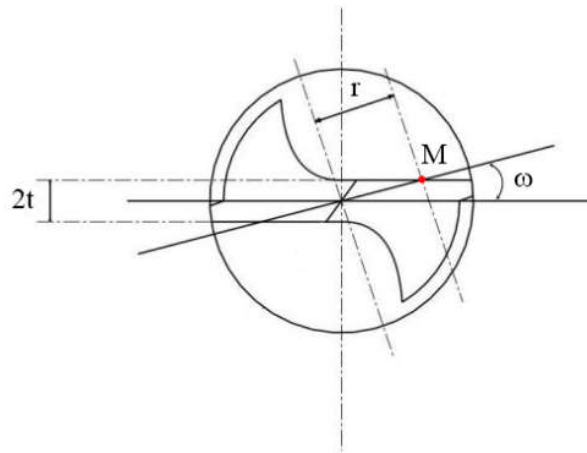


Figura 3-3 – Representação do ângulo ω

$$\omega = \sin^{-1} \frac{t}{r} \quad (3-3)$$

Como consequência da geometria de corte nesta zona da broca, no ponto M a velocidade de corte e a tangente à aresta de corte não são perpendiculares (Figura 3-2), pelo que neste caso se aplica o modelo de corte oblíquo.

A distribuição da força de avanço e de binário ao longo da aresta de corte será definida em termos dos parâmetros geométricos da broca, condições de corte e características do material. Devido à simetria geométrica das brocas, o modelo será desenvolvido tendo em conta apenas uma aresta de corte e só na formulação final se terá em conta as duas aresta de corte.

- **Análise da geometria de corte na aresta de corte**

Os incrementos de força de avanço e binário são determinados assumindo que a geometria de corte permanece igual em todos os elementos dl , ou seja, que o ângulo de avanço, α , permanece constante a qualquer distância r que o ponto M se situe do eixo da broca equação (3-4),

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{f}{2\pi r} \right) \quad (3-4)$$

onde f é o avanço da broca.

Na Figura 3-4 pode-se observar ao pormenor a geometria de corte num ponto qualquer da aresta de corte.

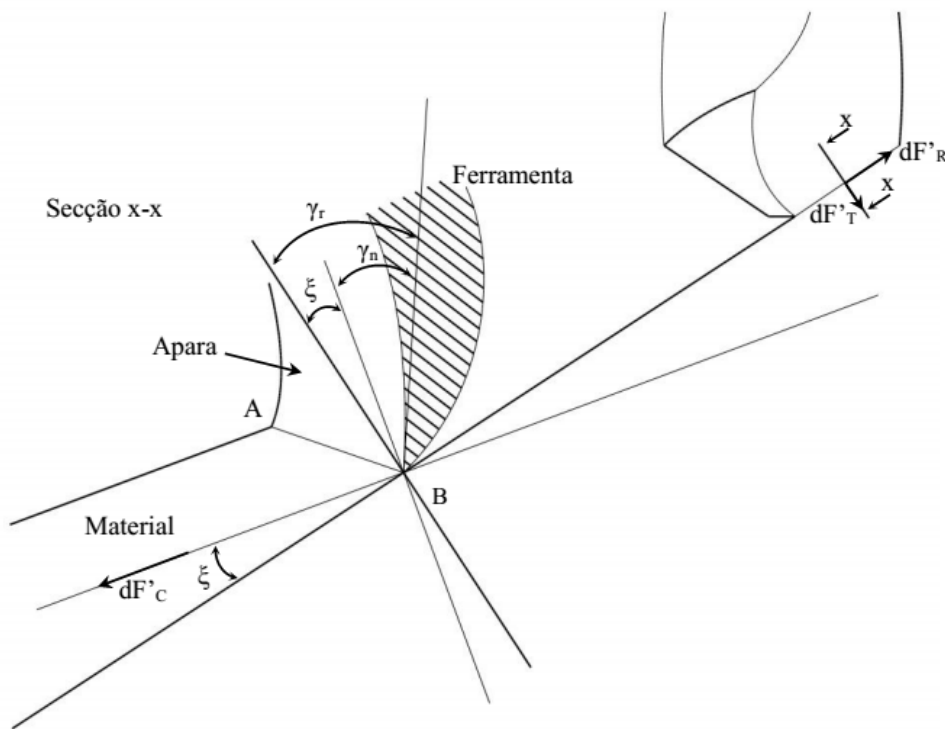


Figura 3-4 – Geometria de corte na aresta de corte

O ângulo ξ , é a projeção axial do ângulo ω no plano de corte como se pode observar na Figura 3-5.

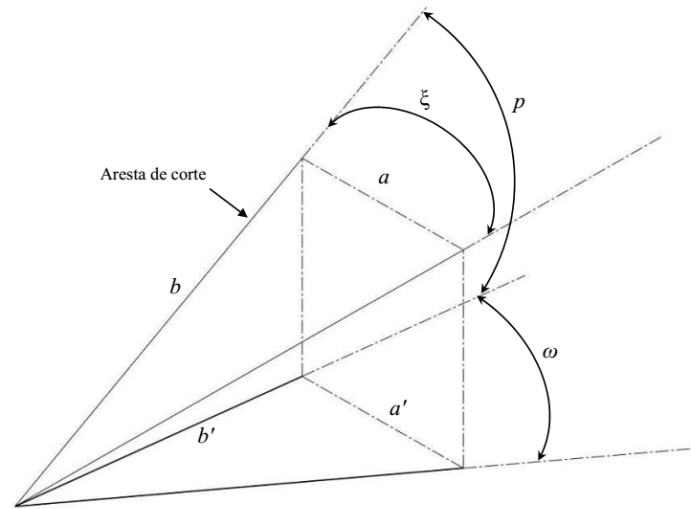


Figura 3-5 - Projeção do ângulo ω no plano de corte

$$b' = b \cos p \quad (3-5)$$

$$a' = a \quad (3-6)$$

$$a = b \tan \xi \quad (3-7)$$

$$\tan \omega = \frac{a}{b \cos p} \quad (3-8)$$

$$\tan \omega = \frac{\tan \xi}{\cos p} \quad (3-9)$$

Pelas equações (3-5) a (3-9), pode-se escrever a equação (3-10).

$$\xi = \tan^{-1}(\tan \omega \cos p) \quad (3-10)$$

O ângulo de γ_r pode ser calculado por:

$$\gamma_r = \frac{\tan \delta \cos \omega}{\sin p - \cos p \tan \delta \sin \omega} \quad (3-11)$$

Pela Figura 3-4 o ângulo de ataque normal, γ_n , é igual a:

$$\gamma_n = \gamma_r - \xi \quad (3-12)$$

A Figura 3-6 permite a determinação do passo de hélice em função do ângulo de hélice, δ_0 , o qual se pode exprimir pela seguinte equação.

$$H = 2\pi R \cot \delta_0 \quad (3-13)$$

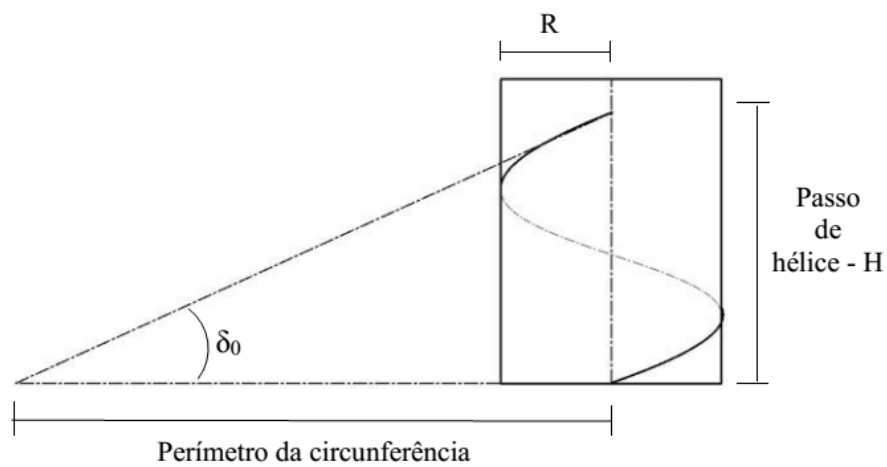


Figura 3-6 – Passo de hélice

Na Figura 3-7, pode-se observar que após o afiamento da broca, embora o passo de hélice permaneça constante (pois é um parâmetro de construção da ferramenta), o ângulo de hélice é variável ao longo da aresta de corte, pelo que se pode descrever o passo de hélice no ponto M através da equação (3-14).

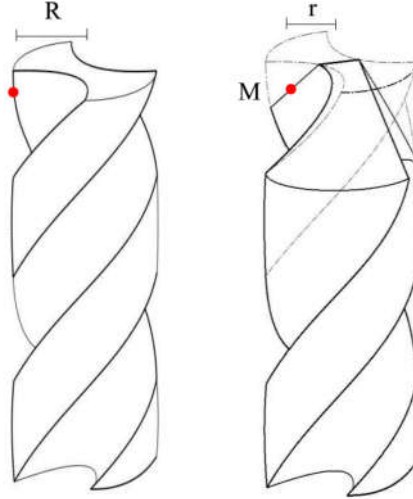


Figura 3-7 – Passo de hélice antes e após afiamento

$$H = 2\pi r \cot \delta \quad (3-14)$$

Onde δ é o ângulo de hélice num ponto qualquer da aresta de corte não coincidente com a extremidade da aresta de corte, assim pelas equações (3-13) e (3-14), e como H é constante, obtém-se a equação (3-15),

$$2\pi R \cot \delta_0 = 2\pi r \cot \delta \quad (3-15)$$

Recorrendo a algumas simplificações a equação (3-15) pode ainda exprimir-se pela equação:

$$\tan \delta = \frac{r}{R} \tan \delta_0 \quad (3-16)$$

- **Determinação das contribuições de força de avanço e de binário**

Os elementos de força de avanço dF_a e de binário dB são determinados nos termos da força elementar dF_C na direção paralela à velocidade de corte V_C , da força elementar dF_T na direção normal à velocidade de corte e à aresta de corte no ponto M , e em termos da força elementar dF_R na direção normal a dF_C e dF_T , como ilustrado na Figura 3-8.

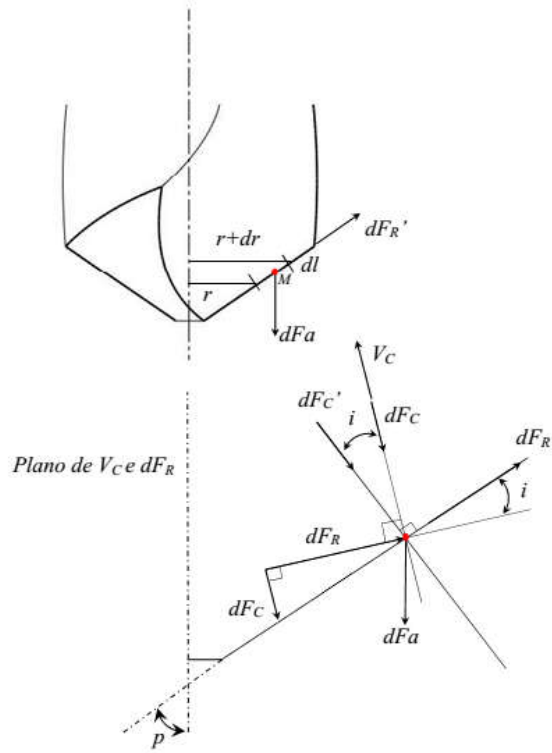


Figura 3-8 – Vista das forças e velocidade de corte na aresta de corte

Os mecanismos de corte nesta zona da broca são caracterizados pelo modelo de corte oblíquo, os elementos de força de corte, dF_c , de força normal à direção de corte, dF_T , e elementos de força normal à força de corte e força de avanço, dF_R , podem ser calculados em função de dF'_c , dF'_T e dF'_R e do ângulo de inclinação i , característico deste tipo de modelo de corte (Figura 3-8), obtendo-se as equações

$$dF_c = dF'_c \cos i + dF'_R \sin i \quad (3-17)$$

$$dF_T = dF'_T \quad (3-18)$$

$$dF_R = dF'_R \cos i - dF'_c \sin i \quad (3-19)$$

O ângulo de inclinação, i no ponto M pode ser determinado pela equação:

$$i = \sin^{-1}(\sin \omega \cdot \sin p) \quad (3-20)$$

A partir destes elementos de força (e recorrendo à Figura 3-8) no ponto M pode-se formular quer o elemento de força de avanço dF_a e o elemento de binário dB .

$$dF_a = (dF_T^2 + (dF_c \cos i + dF_R \sin i)^2)^{1/2} \sin(\beta_n - \gamma_n - \xi) \sin p - (dF_c \sin i - dF_R \cos i) \cos p \quad (3-21)$$

$$dB = r dF_c \quad (3-22)$$

O cálculo dos elementos dF_T , dF_C e dF_R tem por base o modelo de corte oblíquo apresentado por Merchant (cit. Oxley [19]). Este modelo baseia-se na análise das tensões no plano de corte e na interface apara/ferramenta, em que a força resultante no plano de corte e na interface apara/ferramenta estão em equilíbrio (Figura 3-9).

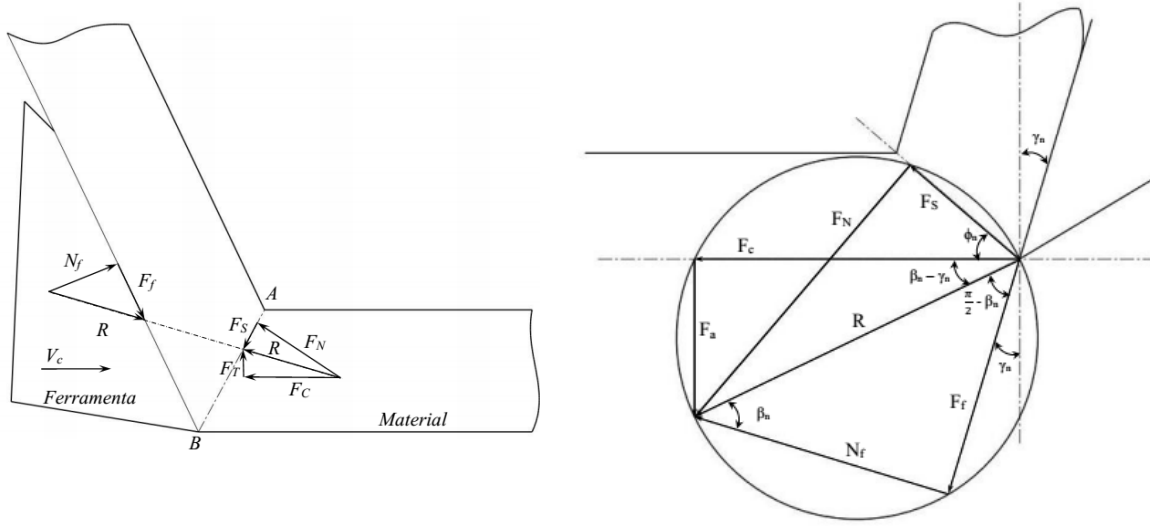


Figura 3-9 – Diagrama de forças e círculo de Merchant

Os componentes dF'_C , dF'_T e dF'_R ilustrados na Figura 3-8 e na Figura 3-9, podem ser determinados pelas equações

$$dF'_C = dF_s \frac{\cos(\beta_n - \gamma_n)}{\cos \theta} \quad (3-23)$$

$$dF'_T = dF_s \frac{\sin(\beta_n - \gamma_n)}{\cos \theta} \quad (3-24)$$

$$dF'_R = (dF'_C^2 + dF'_T^2)^{1/2} \sin \beta_n \tan i \quad (3-25)$$

onde $\theta = \phi_n + \beta_n - \gamma_n$ e ϕ_n é o ângulo de corte normal.

O ângulo de corte normal, ϕ_n , é obtido através da equação de Merchant (equação (3-26)).

$$\phi_n = \frac{\pi}{4} + \frac{(\gamma_n - \beta_n)}{2} \quad (3-26)$$

Finnie e Shaw (cit. Williams [20]) definem que o ângulo de atrito, β_n , pode ser assumido como independente da velocidade de corte e relacionado com o ângulo de ataque normal

$$\beta_n = A + \frac{\gamma_n}{2} \quad (3-27)$$

onde A se assume como uma constante característica do material.

Na Figura 3-10 representa-se a força elemental dF_s , que, supondo uma distribuição uniforme, se pode exprimir por:

$$dF_s = \tau_s dA_{AB} \quad (3-28)$$

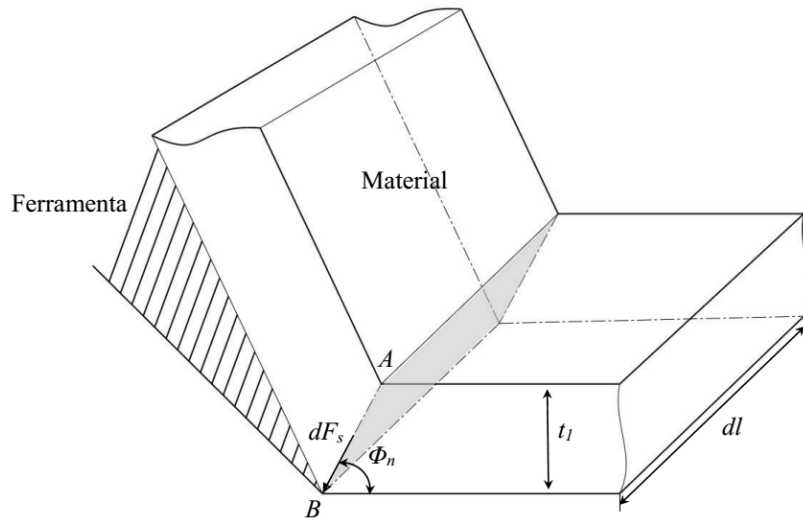


Figura 3-10 – Força elemental dF_s

onde dA_{AB} é a área do plano de corte sombreado na Figura 3-10.

Tendo em conta esta figura, a área elemental dA_{AB} pode ser determinado por:

$$dA_{AB} = \overline{AB} \cdot dl \quad (3-29)$$

$$\overline{AB} = \frac{t_1}{\sin \phi_n} \quad (3-30)$$

em que t_1 é a espessura da peça antes do corte.

Pelas equações (3-28), (3-29) e (3-30) obtém-se a equação:

$$dF_s = \tau_s \frac{t_1}{\sin \phi_n} dl \quad (3-31)$$

onde τ_s é a tensão de corte no plano de corte AB e pode ser estimado pela formulação apresentada por Abuladze (cit. Pamies Teixeira [3]) equação (3-32), em que n é o coeficiente de encruamento, σ_R a tensão de rotura do material e γ_s a distorção da apara que pode ser calculada pela equação (3-33).

$$\tau_s = 0.74 \sigma_R \gamma_s^n \quad (3-32)$$

$$\gamma_s = \cot \phi_n + \tan(\phi_n - \gamma_n) \quad (3-33)$$

Resta-nos exprimir o elemento de aresta dl em função de dr . Para tal com auxílio da Figura 3-11, podemos escreve:

$$r^2 = t^2 + (l' + x)^2 \quad (3-34)$$

$$l' = (r^2 - t^2)^{1/2} - x \quad (3-35)$$

$$x = \frac{d'}{2} \cos(\pi - \psi) = -\frac{d'}{2} \cos(\psi) \quad (3-36)$$

$$l = \frac{l'}{\sin p} \quad (3-37)$$

$$l = \frac{1}{\sin p} (r^2 - t^2)^{1/2} + \frac{d'}{2} \cos(\psi) \quad (3-38)$$

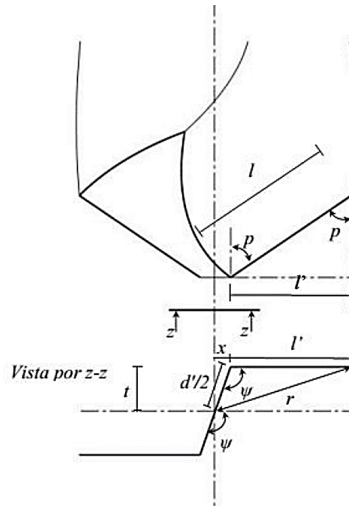


Figura 3-11 – Relações trigonométricas da aresta de corte

Desta forma, o elemento de aresta dl pode ser escrito pela equação:

$$dl = \frac{1}{\sin p} \frac{r}{(r^2 - t^2)^{1/2}} dr \quad (3-39)$$

Para cada ponto M que se desloca ao longo da aresta de corte, a profundidade de corte pode ser obtida por:

$$t_1 = \frac{f}{2} \sin p \cos \xi \quad (3-40)$$

Assim, fazendo as substituições correspondentes na equação (3.31) obtém-se a equação:

$$dF_s = \tau_s \frac{f \cos \xi}{2 \sin \phi_n} \frac{r}{(r^2 - t^2)^{1/2}} dr \quad (3-41)$$

Substituindo nas equações definidas atrás, podemos obter a seguinte equações diferenciais, que integradas no intervalo $[d'/2; d/2]$ permitem obter a resultante de força de avanço e binário ao longo da aresta de corte equações.

$$\frac{dF_a}{dr} = \tau_s \frac{f \sin p \cos \xi}{2 \sin \phi_n \cos \theta_n} (\sin(\beta_n - \gamma_n - \xi) \sin p - \cos p) \frac{r}{(r^2 - t^2)^{1/2}} \quad (3-42)$$

$$\frac{dB}{dr} = \tau_s \frac{f \sin p \cos \xi}{2 \sin \phi_n \cos \theta_n} (\cos(\phi_n - \gamma_n - i)) \frac{r^2}{(r^2 - t^2)^{1/2}} dr \quad (3-43)$$

$$F_{a1} = 2 \int_{d'/2}^{d/2} \tau_s \frac{f \sin p \cos \xi}{2 \sin \phi_n \cos \theta_n} (\sin(\beta_n - \gamma_n - \xi) \sin p - \cos p) \frac{r}{(r^2 - t^2)^{1/2}} dr \quad (3-44)$$

$$B_1 = 2 \int_{d'/2}^{d/2} \tau_s \frac{f \sin p \cos \xi}{2 \sin \phi_n \cos \theta_n} (\cos(\phi_n - \gamma_n - i)) \frac{r^2}{(r^2 - t^2)^{1/2}} dr \quad (3-45)$$

3.2 Modelo para zona de indentação

Como já foi introduzido no capítulo 2, o modelo de indentação de Kashanov estabelece a formulação matemática que descreve o fenómeno de indentação de uma cunha simétrica e não deformável, numa superfície plana de um corpo rígido plástico. Será com base neste modelo que desenvolveremos o modelo para zona de indentação.

Pela Figura 3-12 podemos facilmente estabelecer as semelhanças entre a ponta da broca e a representação gráfica utilizada neste modelo, o que viabiliza a utilização desta formulação.

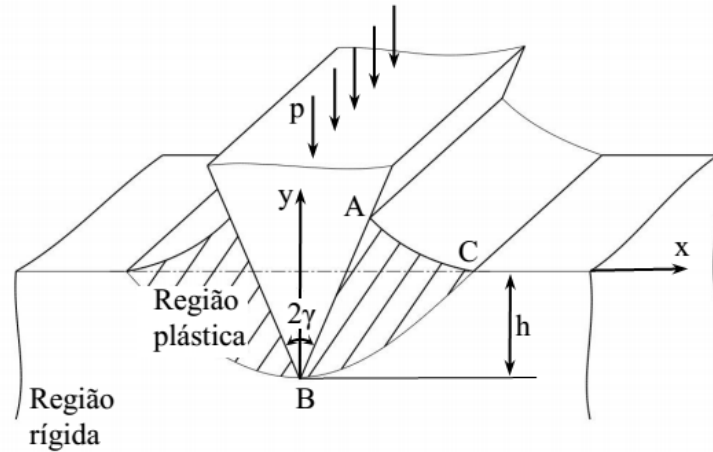


Figura 3-12 – Semelhanças entre a ponta da broca e modelo proposto por Kashanov

À medida que a aresta força a entrada pelo material, este deforma e é empurrado pelos dois lados da aresta. Para fenómeno de deformação plástica, Kashanov estabelece a representação gráfica de linhas de escorregamento ilustrada na Figura 3-13.

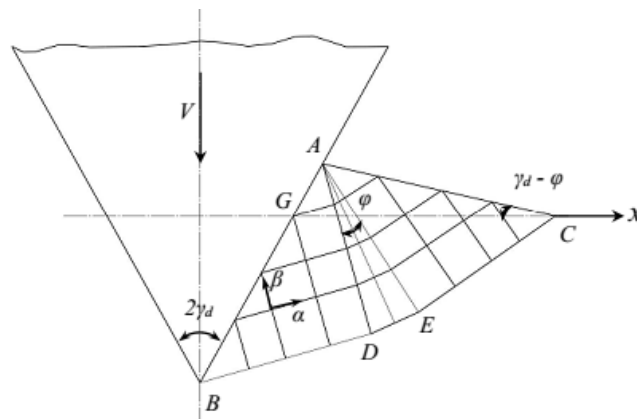


Figura 3-13 – Linhas de escorregamento

A região ABC encontra-se no regime plástico. A linha AC pode-se considerar aproximadamente retilínea. O plano de escorregamento pode-se representar como na Figura 3-13.

Assume-se que a pressão de contacto p a longo de AB é constante e que, o estado de tensões no triângulo ABD e AEC é uniforme. A profundidade de penetração denotada por h e o comprimento de AC ($\triangle ADB = \triangle ACE$) l ; a pressão p e o comprimento l não são conhecidos. As regiões de tensão uniforme estão ligadas pelo triângulo ADE com amplitude angular φ .

Ainda através da Figura 3-13, podemos observar duas famílias de linhas de escorregamento, linhas α e as linhas β . Hencky estabelece duas equações para estas linhas, respetivamente equações (3-48) e (3-49).

$$p + 2k\phi = f_1(y) + C_1 \quad (3-46)$$

$$p - 2k\phi = f_2(x) + C_2 \quad (3-47)$$

onde $C_1 = \eta$ e $C_2 = \xi$

$$p - 2k\phi = \xi \quad (3-48)$$

$$p + 2k\phi = \eta \quad (3-49)$$

$$\xi = \frac{\sigma}{2k} - \theta_1 \quad (3-50)$$

em que k é a tensão de corte crítica e p é uma pressão hidrostática.

Para $\triangle ABD$, $\theta = \frac{\pi}{4} - \gamma_d$, p é representada por σ e o parâmetro $\xi_{\triangle ABD} = \frac{\sigma}{2k} - \frac{\pi}{4} + \gamma_d$.

No $\triangle ACE$ $\theta = \frac{\pi}{4} - \gamma_d + \varphi$, $p = -k$ e o parâmetro $\xi_{\triangle ACE} = -\frac{1}{2} - \frac{\pi}{4} + \gamma_d - \varphi$

Como ξ é constante através da região plástica $\xi_{\triangle ABD} = \xi_{\triangle ACE}$, então podemos obter,

$$\sigma = -k(1 + 2\varphi) \quad (3-51)$$

De acordo com a Figura 3-13, o segmento de reta AC faz um ângulo $\gamma - \varphi$ com o eixo horizontal logo,

$$l \cdot \cos \gamma_d - h = l \cdot \sin(\gamma_d - \varphi) \quad (3-52)$$

$$l = \frac{h}{\cos \gamma_d - \sin(\gamma_d - \varphi)} \quad (3-53)$$

Segundo Elhachimi, Torbaty e Joyot [17], γ_d é o ângulo de ataque dinâmico na zona de indentação e pode ser determinado pela equação:

$$\gamma_d = -\tan^{-1}(\tan p \cos \pi - \psi) \quad (3-54)$$

O valor de h é conhecido e igual ao avanço f . Da igualdade dos triângulos OBG e ACG podemos escrever:

$$h^2 \cdot \tan \gamma_d = (l \cdot \cos \gamma_d - h)[l \cdot \cos(\gamma_d - \varphi) + (l \cdot \cos \gamma_d - h) \cdot \tan \gamma_d] \quad (3-55)$$

Eliminando l/h das equações (3-54) e (3-55) e recorrendo a algumas simplificações, obtemos a relação que determina φ .

$$2 \cdot \gamma_d = \varphi + \arccos \tan\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (3-56)$$

A pressão p (representada na Figura 3-12) é uma das tensões principais e consequentemente é igual a $\sigma - k$, então

$$p = -2k(1 + \varphi) \quad (3-57)$$

A força total por unidade de comprimento da aresta na direção z é igual a

$$P = 2pl \sin \gamma_d \quad (3-58)$$

e é uma função variável com o ângulo γ e a profundidade de penetração h .

Pelas equações (3-53), (3-57) e (3-58) e assumindo o comprimento total da aresta doravante e denominado como diâmetro de indentação d_i , obtemos a força para o total do comprimento da aresta,

$$P = \frac{-4kd_i(1 + \varphi)h \sin \gamma_d}{\cos \gamma - \sin(\gamma - \varphi)} \quad (3-59)$$

Adaptando a equação (3-59) à geometria da broca obtemos as seguintes expressões,

$$Fa_2 = \frac{4kd_i(1 + \varphi)f \sin \gamma_d}{\cos \gamma_d - \sin(\gamma_d - \varphi)} \quad (3-60)$$

$$B_2 = \frac{2kd_i^2(1 + \varphi)f \sin \gamma_d}{\cos \gamma_d - \sin(\gamma_d - \varphi)} \quad (3-61)$$

No âmbito desta tese, defende-se que o diâmetro de indentação pode não ser igual ao comprimento da aresta transversal de corte, como é proposto por muitos autores, mas sim uma fração da mesma. Não sendo possível quantificá-la. Torna-se necessário a sua determinação pela via experimental, originando por isso o carácter semi-empírico deste modelo.

3.3 Modelo para determinação da força de avanço e do binário total

De acordo com estabelecido no início deste capítulo, uma vez estabelecidos os modelos que determinam a força de avanço e binário para as duas zonas distintas da ponta da broca pode-se apresentar a formulação que permite determinar a força de avanço e o binário desenvolvidos durante

o processo de furação, assim substituído as equações (3-44), (3-45), (3-60) e (3-61) nas equações (3-1) e (3-2) temos:

$$F_{a_T} = 2 \int_{d'/2}^{d/2} \tau_s \frac{f \sin p \cos \xi}{2 \sin \phi_n \cos \theta_n} (\sin(\beta_n - \gamma_n - \xi) \sin p - \cos p) \frac{r}{(r^2 - t^2)^{1/2}} dr + \frac{4kd_i(1 + \varphi)f \sin \gamma_d}{\cos \gamma_d - \sin(\gamma_d - \varphi)} \quad (3-62)$$

$$B_T = 2 \int_{d'/2}^{d/2} \tau_s \frac{f \sin p \cos \xi}{2 \sin \phi_n \cos \theta_n} (\cos(\phi_n - \gamma_n - i)) \frac{r^2}{(r^2 - t^2)^{1/2}} dr + \frac{2kd_i^2(1 + \varphi)f \sin \gamma_d}{\cos \gamma_d - \sin(\gamma_d - \varphi)} \quad (3-63)$$

Procedimento experimental

Neste capítulo apresenta-se o procedimento experimental realizado para a presente dissertação, este será dividido em 3 partes.

Na primeira parte serão descritos os materiais dos provetes, as brocas e os parâmetros de corte utilizados durante a experimentação. A segunda parte é constituída pela descrição dos sensores de aquisição dos dados. A terceira e última parte a descrição dos equipamentos utilizados para obtenção dos furos e será feita uma descrição da metodologia utilizada nos ensaios.

4.1 Material utilizado, brocas e parâmetros de corte

Para os ensaios os provetes de geometria aproximadamente retangular são de aço de baixa liga fornecido pela Ramada Aços como as seguintes características:

Tabela 4-1 - Características dos Provetes

Material	Ramada Aços RPM32	
	DIN	42 CrMo 4
	UNE	F-1252
	W. NR.º	1.7225
Composição química [%]	C	0.42
	Si	≤ 0,40
	Mn	0.75
	Cr	1
	Mo	0.2
Caraterísticas mecânicas	Dureza HB (max)	225/380
	Tensão à rotura [kg/mm ²]	≥ 77
	Tensão de corte crítica [kg/mm ²]	≥ 51
	Extensão após a rotura (% L ₀ =5)	≥ 10

Sendo que o objetivo desta dissertação é caracterizar a força de avanço e o binário em brocas helicoidais de ponta cônica, escolheram-se brocas da marca DORMER modelo A100. Foram utilizados quatro diâmetros diferentes, Figura 4-1, para cada diâmetro usaram-se seis brocas. Cada unidade realiza um único ensaio de modo a garantir as mesmas condições iniciais de corte, ou seja, as brocas utilizadas não possuem defeitos por utilizações anteriores.



Figura 4-1 - Brocas utilizadas (DORMER A100)

Todos os parâmetros de corte foram calculados a partir da velocidade de corte recomendada pelo fabricante, tendo sido considerado as brocas selecionadas e a dureza do aço utilizado para os provetes.

Tabela 4-2 - Parâmetros de Corte

Diâmetro da broca [mm]	Norma	Ângulo da ponta [°]	Velocidade de corte para aço 42CrMo4 [m/min]	Avanço [mm/rev]	Rotação [min-1]	Velocidade do avanço [mm/min]
8	DIN 338	118	20	0.138	796	109.848
10				0.165	637	105.105
12				0.178	531	94.518
14				0.194	455	88.301

Além dos parâmetros descritos na Tabela 4-2, é necessário obter outras dimensões da ponta das brocas, nomeadamente o comprimento da aresta transversal de corte, o ângulo da aresta transversal de corte e a distância entre arestas de corte. Para este efeito desenvolveu-se uma montagem para fotografar as pontas das brocas. A montagem minimiza o erro de relação de

perpendicularidade da lente relativamente à ponta da broca. A fotografia obtida é posteriormente analisada no *software SolidWorks*, onde se obtém as medidas acima referidas, Figura 4-2.

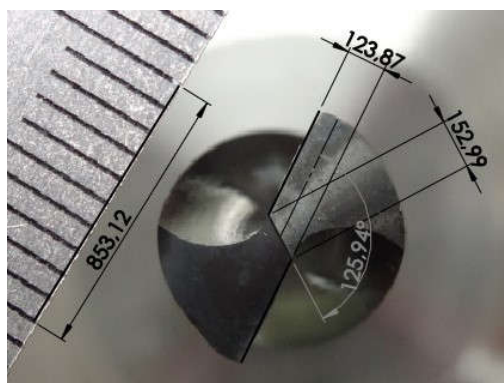


Figura 4-2 - Método de medição de dimensões da ponta das brocas

Realizam-se três medições para cada broca por meio do processo acima descrito, as dimensões finais são obtidas através da média das leituras, Tabela 4-3.

Tabela 4-3 - Dimensões da ponta da broca

Diâmetro da broca – d [mm]	Distância entre arestas de corte – $2t$ [mm]	Comprimento da aresta transversal de corte – d' [mm]	Ângulo da aresta transversal – ψ [°]
8	1.18	1.47	126
10	1.44	1.77	
12	1.73	2.12	
14	1.90	2.38	

4.2 Sensores para aquisição de dados

São utilizados dois tipos de sensores distintos para se fazer a aquisição de dados durante os ensaios, cada um dos sensores mede especificamente uma grandeza.

Os valores da força de avanço são adquiridos por um dinamómetro *Kistler 9257B* que está ligado a um amplificador de carga multicanal *Kistler 5070*.



Figura 4-3 - Dinamómetro e Amplificador de Sinal Kinstler

Os valores do binário adquirem-se por meio de um sensor de binário desenvolvido no *DEMI*. Este sensor foi dimensionado para resistir a torções na ordem dos 30 Nm, tendo sido sujeito previamente a ensaios de torção para determinar a sua curva de calibração.

A conversão de sinal analógico para sinal digital foi realizada através de um sistema de aquisição de dados (*DAQ*), Figura 4-4. Este sinal é posteriormente processado pelo *software LabView*, que permite uma análise gráfica da força de avanço e binários medidos pelos sensores.



Figura 4-4 – Módulos de Aquisição de Dados

4.3 Equipamento utilizado e descrição dos ensaios

Os ensaios experimentais consistem em dois tipos de furação distintos: furos passantes a cheio e furos passantes com pré furo. Estes ensaios têm por objetivo obter leituras em zonas distintas da broca, posteriormente ao fazer a sobreposição de resultados pode-se obter os valores de força de avanço e de binário desenvolvidos na aresta transversal de corte com o objetivo de se estabelecer a equação do diâmetro de indentação.

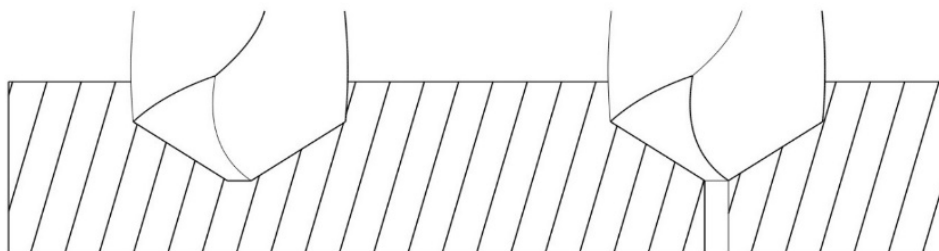


Figura 4-5 – Esquematização gráfica do ensaio a cheio e com pré-furo de diâmetro igual à aresta transversal de corte

Através do ensaio com furo passante a cheio obtém-se as medidas de força de avanço e de binário desenvolvidos por todos os elementos cortantes e não cortantes da broca. Nos ensaios com furo passante com pré-furo obtém-se apenas as contribuições de força de avanço e de binário desenvolvido nas arestas de corte.

Os valores de força de avanço e de binário desenvolvido pela aresta transversal de corte são resultantes da subtração dos valores obtidos entre os dois tipos de ensaio.

Os ensaios realizaram-se no centro de maquinagem vertical *LEADWELL VMC-15* existente no Laboratório de Tecnologia Industrial do DEMI da FCT.



Figura 4-6 - Centro de Maquinagem

A utilização do equipamento CNC permite uma maior precisão no decorrer dos ensaios, pois permite estabelecer uma velocidade constante para o avanço axial da broca, o que minimiza o desvio indesejável no primeiro contacto da ponta da broca e o material, este tipo de maquinaria garante também um alinhamento preciso entre os eixos da broca e o do sensor.

A montagem dos sensores no centro de maquinagem tem a configuração apresentada na figura que se segue.



Figura 4-7 - Montagem Experimental dos Sensores

A fixação do provete ao sensor é feita por intermédio da peça superior, visível nas Figura 4-7 e Figura 4-8. Esta que fica ligada ao sensor por aperto mecânico de parafusos, devido ao espaço para o provete descentrado permite realizar duas linhas de furos em cada provete com o intuito de maximizar o material disponível. A peça dimensionou-se com espessura inferior à espessura do provete pelo que no aperto final não existe uma interface fixador/sensor, isto traduz-se na leitura de força de avanço e binário ocorrido unicamente no provete

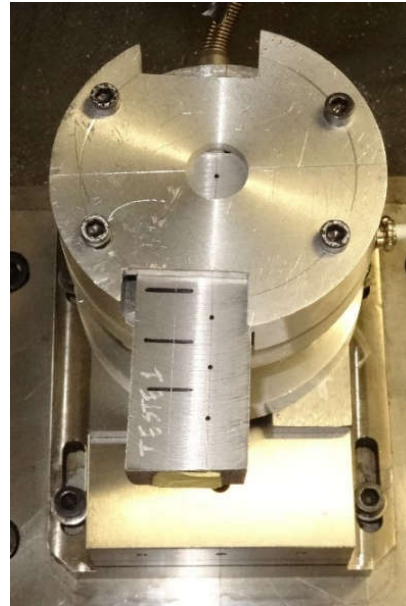
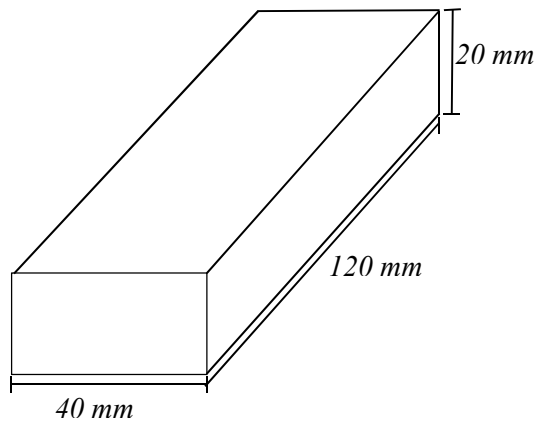


Figura 4-8 – Dimensões do provete e respetiva fixação no sensor de binário

O aperto dos quatro parafusos M6 garante a restrição tridimensional dos provetes garantindo que nos ensaios não ocorre escorregamento na interface provete/sensor.

Entre o sensor de torção e o dinamómetro existem espaçadores, como se pode ver ao pormenor na Figura 4-9, estes permitem a recolha de aparas entre cada ensaio e desobstrução do espaço central do sensor de binário que garante que a broca quando passa completamente o provete não encontra material cortado no ensaio anterior, que iria introduzir dados indesejados nas leituras e assim inviabilizando o ensaio.

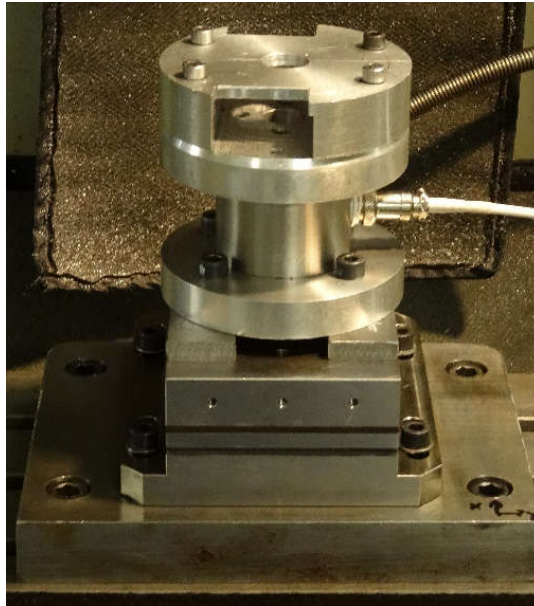


Figura 4-9 - Montagem Experimental dos Sensores

Os ensaios seguem ordem de passos abaixo descrita:

- Todos os pré furos foram maquinados no mesmo centro de maquinagem numa etapa anterior à montagem dos sensores;
- Todas as brocas foram numeradas para garantir a utilização única;
- Para ensaios com pré furo, os eixos do pré furo e do sistema de furação foram alinhados por meio de aproximação de uma broca com o diâmetro do pré-furo ao material;
- O centro de maquinagem foi programado manualmente com os parâmetros de corte de cada diâmetro de broca;
- O *software Labview* inicia a aquisição de dados a partir no momento em que o centro de maquinagem entra em funcionamento e termina a aquisição após a broca se encontrar totalmente fora do provete;
- Após a paragem do centro de maquinagem são recolhidas as aparas e o espaço de trabalho da máquina é limpo de modo a que não se acumulem aparas entre furos;
- Os dados adquiridos pelo *Labview* são exportados para o *software Matlab* onde é feita a análise numérica e gráfica de cada furo.

Apresentação e discussão de resultados

Neste capítulo apresenta-se e discute-se os resultados obtidos no decorrer do procedimento experimental e simulação computacional. Será analisada a precisão do modelo semi-empírico e a viabilidade da sua implementação.

5.1 Resultados Experimentais

Como foi descrito no capítulo anterior, a metodologia utilizada na experimentação tem como objetivo adquirir os valores de força de avanço e binário desenvolvidos em duas zonas distintas das brocas: zona da aresta transversal de corte e zona das arestas de corte.

Com os valores gerados na aquisição de dados durante a furação e após submeter o sinal a filtragem, obtiveram-se os gráficos de distribuição de força de avanço e de binário. Na Figura 5-1 podemos observar graficamente a evolução da força de avanço e binário num ensaio com pré-furo de uma broca de diâmetro de 14 milímetros e na Figura 5-2 um ensaio com furo a cheio de uma broca com as mesmas características.

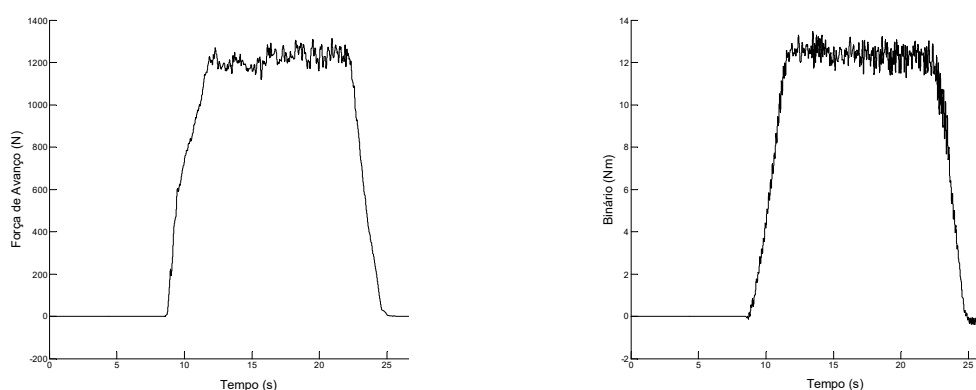


Figura 5-1 – Resultados ensaio furo com pré-furo

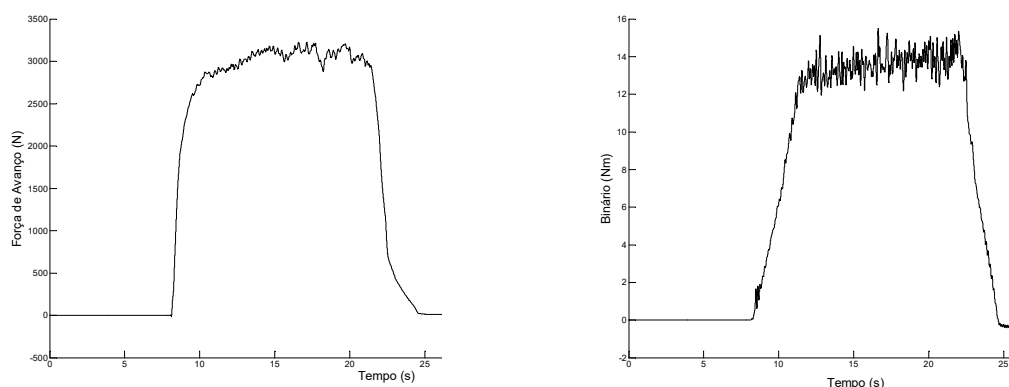


Figura 5-2 - Resultados ensaio com furo a cheio

Previsivelmente os valores obtidos nos furos a cheio são superiores, pois nestes ensaios os valores obtidos são representantes de todos elementos da ponta da broca, cortantes e não cortantes. Os ensaios com pré-furo, os valores são mais baixos pois mede-se apenas a força de avanço e de binário nas arestas de corte.

Na Tabela 5-1 apresenta-se todos os valores obtidos nos ensaios durante o procedimento experimental.

Tabela 5-1 - Resultados obtidos no procedimento experimental

Tipo de Ensaio	Broca nº	Força Média no Ensaio [N]	Binário Médio no Ensaio [Nm]	Média da Força de Avanço [N]	Média Binário [Nm]
Com pré-furo	8,1	640,57	3,86	620.20	3.95
	8,2	606,65	3,63		
	8,3	613,39	4,35		
Cheio	8,4	1393,70	4,03	1391.37	3.97
	8,5	1467,24	3,99		
	8,6	1313,23	3,89		
Com pré-furo	10,1	757,20	6,92	830.63	6.77
	10,2	859,56	6,66		
	10,3	875,13	6,74		
Cheio	10,4	2148,31	7,45	1981.13	7.08
	10,5	1779,75	6,93		
	10,6	2015,40	6,85		
Com pré-furo	12,1	1028,30	9,12	1067.73	9.29
	12,2	1019,24	8,98		
	12,3	1155,72	9,79		
Cheio	12,4	2482,50	10,09	2665.23	10.88
	12,5	3022,33	11,76		
	12,6	2490,92	10,78		
Com pré-furo	14,1	1152,00	12,64	1182.87	12.47
	14,2	1238,31	12,34		
	14,3	1158,33	12,43		
Cheio	14,4	2965,00	14,51	2988.93	14.22
	14,5	3109,31	13,82		
	14,6	2892,52	14,33		

Os valores de força de avanço e binário na zona da aresta transversal de corte obtêm-se com recurso aos resultados da Tabela 5-1, sendo estes valores a diferença entre os valores das médias dos ensaios com pré furo aos valores das médias dos ensaios a cheio, os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5-2.

Tabela 5-2 - Força de Avanço e Binário na Aresta Transversal de Corte

Broca de diâmetro [mm]	Força de Avanço na Aresta Transversal de Corte [N]	Binário na aresta Transversal de Corte [Nm]
8	771,16	0,02
10	1150,50	0,30
12	1597,50	1,58
14	1806,07	1,75

5.2 Validação do modelo

Devido à complexidade matemática do modelo desenvolvido no capítulo 3 recorreu-se ao *software Matlab* para se obter resultados teóricos através de simulação computacional. À semelhança do modelo matemático, a simulação foi dividida em duas partes: zona da aresta transversal de corte e zona das arestas de corte.

5.2.1 Zona da aresta transversal de corte

A simulação computacional divide-se em duas fases, na primeira a obtém-se os valores de um diâmetro de indentação com recurso aos valores de força de avanço e de binário determinados durante a experimentação.

Na fase seguinte recorre-se aos resultados obtidos na fase anterior para se estabelecer a equação que define este diâmetro de indentação equivalente. Este diâmetro de indentação equivalente entende-se como sendo uma porção do comprimento da aresta transversal de corte para o qual se transpõe fenómeno de indentação ocorrido ao longo de todo o comprimento da aresta transversal de corte, esta equação será posteriormente aplicada nas equações da força de avanço e de binário na zona da aresta transversal de corte.

- **Diâmetro de indentação equivalente**

Para se estabelecer a equação que relaciona o diâmetro de indentação e o comprimento da aresta transversal de corte, recorre-se a equação (3-60).

Esta equação permite que a equação para o diâmetro de indentação, d_i , fique definida em função da geometria da broca, propriedades do material e força de avanço obtida experimentalmente, equação (5-1).

$$d_i = \frac{Fa_1 \cos \gamma_d - \sin(\gamma_d - \varphi)}{4k(1 + \varphi)f \sin \gamma_d}, \quad (5-1)$$

O código *Matlab* apresentado no anexo A determina os resultados da equação (5-1), e os valores obtidos estão representados na Tabela 5-3.

Tabela 5-3 – Diâmetro de Indentação

Diâmetro da broca [mm]	Comprimento da aresta transversal de corte – d' [mm]	Diâmetro de Indentação - d_i [mm]
8	1.47	0.73
10	1.77	0.91
12	2.12	1.17
14	2.38	1.22

A análise gráfica destes valores, mais concretamente a partir da análise da linha de tendência permite obter uma equação que relaciona o diâmetro de indentação, d_i , com o comprimento da aresta transversal de corte, d' .

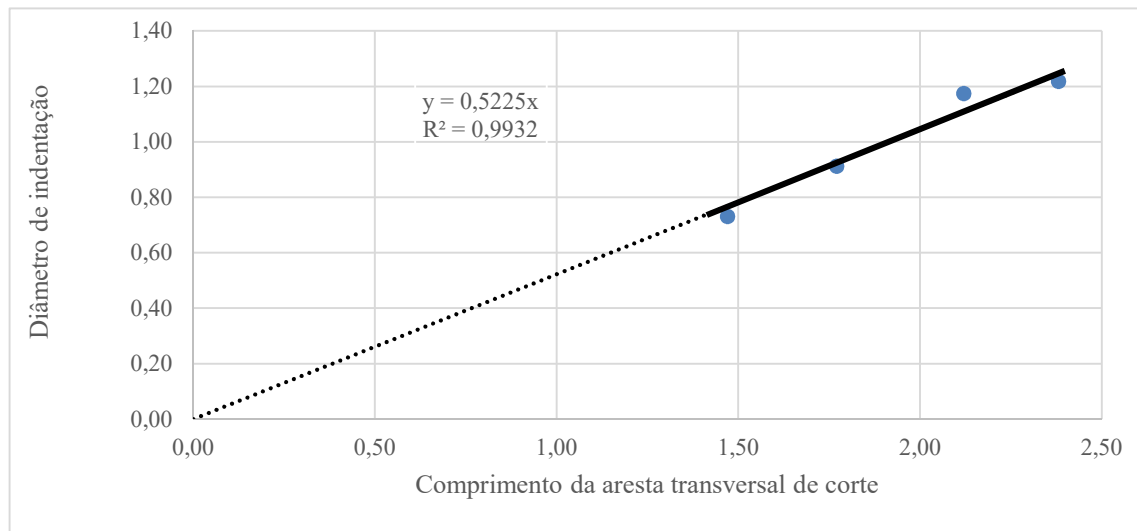


Figura 5-3 – Diâmetro de indentação vs comprimento da aresta transversal de corte

Na Figura 5-3 pode-se observar que a linha de tendência linear se adapta aos resultados obtidos ($R^2=0.993$). Note-se ainda que a linha de tendência a cheio se define pelos resultados obtidos para os diâmetros ensaiados, enquanto a linha tracejada representa extrapolação dos resultados experimentais, onde se considera que a dimensão da aresta transversal de corte é nula apenas no diâmetro igual a zero, ou seja, no gráfico da Figura 5-3 a linha de tendência interseja o ponto (0,0).

Tendo em conta os resultados obtidos e a linha de tendência da Figura 5-3, define-se a equação 5.2 como sendo a equação do diâmetro de indentação equivalente.

$$di_{eq} = 0.5225d' \quad (5.2)$$

Segundo esta equação os valores do diâmetro de indentação equivalente em função do comprimento da aresta transversal de corte são apresentados na Tabela 5-4 e na Figura 5-4.

Tabela 5-4 - Diâmetro de indentação equivalente

Diâmetro da broca [mm]	Comprimento da aresta transversal de corte [mm]	Diâmetro de indentação equivalente [mm]
8,00	1,47	0,77
10,00	1,77	0,92
12,00	2,12	1,11
14,00	2,38	1,24

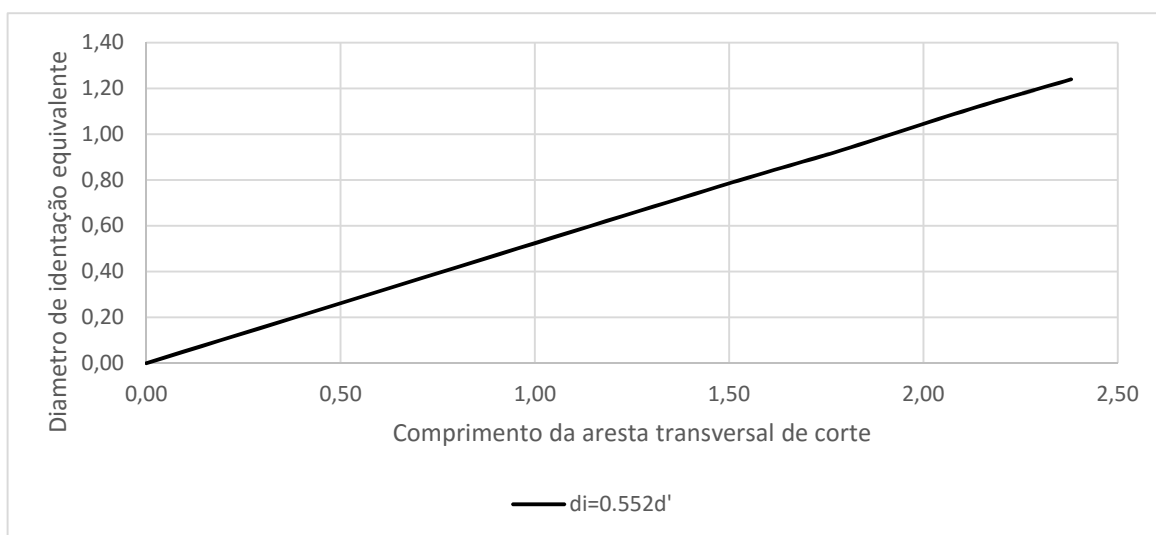


Figura 5-4 – Diâmetro de indentação equivalente

As equações gerais para a força de avanço e de binário na zona da aresta transversal de corte obtêm-se a partir da equação (5-2) e das equações (3-54) e (3-55).

$$Fa_1 = \frac{4k(0.5225d')(1 + \varphi)f \sin \gamma_d}{\cos \gamma_d - \sin(\gamma_d - \varphi)}, \quad (5.3)$$

$$B_1 = \frac{2k(0.5225d')^2(1 + \varphi)f \sin \gamma_d}{\cos \gamma_d - \sin(\gamma_d - \varphi)}. \quad (5.4)$$

Uma vez que o diâmetro de indentação equivalente, d_{ieq} , é obtido através de dados obtidos na experimentação, este método de determinação de força de avanço e de binário na aresta transversal de corte considera-se como sendo uma parcela empírica do modelo final, assim o modelo final denomina-se como sendo semi-empírico.

O código *Matlab* apresentado no anexo A utiliza as equações (5-2), (5-3) e (5-4) para determinar a força de avanço e binário na zona da aresta transversal de corte, os resultados obtidos encontram-se confrontados com os valores obtidos experimentalmente nas Tabela 5-5 e Tabela 5-6.

Tabela 5-5 – Força de avanço na aresta transversal de corte

Diâmetro da broca [mm]	Média dos valores experimentais [N]	Desvio Padrão	Valor Teórico Simulado [N]
8	771,16	60,56	810,48
10	1150,50	125,42	1166,80
12	1597,50	233,05	1507,70
14	1806,07	65,25	1844,70

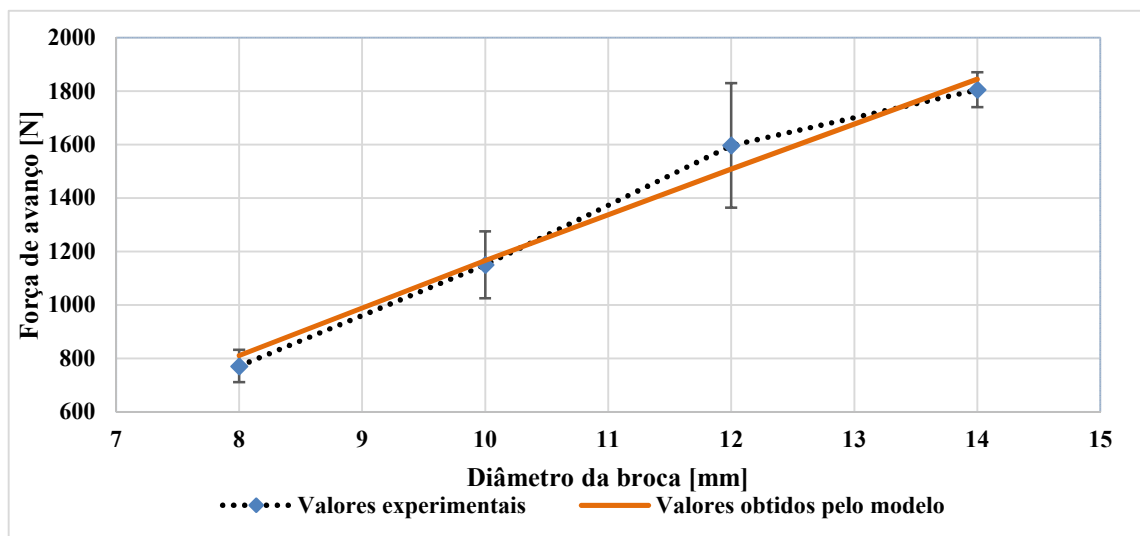


Figura 5-5 – Força de avanço na aresta transversal de corte

Na Figura 5-5 pode-se verificar que os valores teóricos se encontram no intervalo de variância correspondente ao desvio padrão, logo os resultados obtidos consideram-se válidos.

Tabela 5-6 – Binário na aresta transversal de corte

Diâmetro da broca [mm]	Média dos valores experimentais [Nm]	Desvio Padrão	Valor Teórico Simulado [Nm]
8	0,02	0,31	0,31
10	0,30	0,20	0,54
12	1,58	0,43	0,84
14	1,75	0,23	1,15

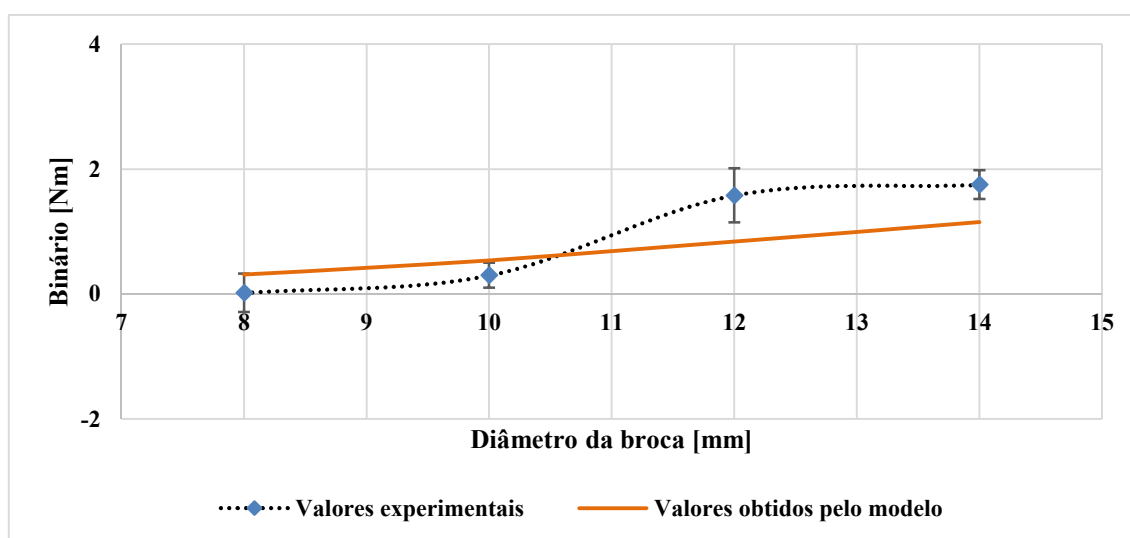


Figura 5-6 - Binário na aresta transversal de corte

Na Figura 5-6 verifica-se que brocas de 8 e 10 mm apresenta resultados satisfatórios, com os valores teóricos compreendidos no intervalo de variância dos valores experimentais, no entanto nas brocas de 12 e 14 mm os valores obtidos por simulação computacional situam-se abaixo do valor experimental, sendo na broca de 12 mm o valor com maior discrepância. Este afastamento nos resultados são influenciados por vários fatores entre eles, a existência de folga e desvios na árvore da máquina, que por sua vez devido aos valores mais elevados de binário nesta zona da broca se tornam mais visíveis quando confrontados com os valores experimentais. No entanto para os valores do binário total, como se irá mostrar, os desvios observados na figura acima têm pouca influência.

5.2.2 Zona das arestas de corte

Para se simular a força de avanço e binário na aresta de corte utiliza-se respectivamente os códigos *Matlab* apresentados no anexo B.

Na Tabela 5-7 apresentam-se os valores da média amostral da experimentação, o respetivo desvio padrão e compara-se com os valores obtidos através da simulação computacional para a força de avanço nas arestas de corte.

Tabela 5-7 – Força de avanço nas arestas de corte

Diâmetro da broca [mm]	Média dos valores experimentais [N]	Desvio Padrão	Valor Teórico Simulado [N]
8	620.21	17.96	556.63
10	830.63	64.07	822.46
12	1067.73	76.32	1073.10
14	1182.87	48.11	1180.10

Na Figura 5-7 pode-se observar os resultados acima apresentados e verificar precisão do modelo teórico proposto.

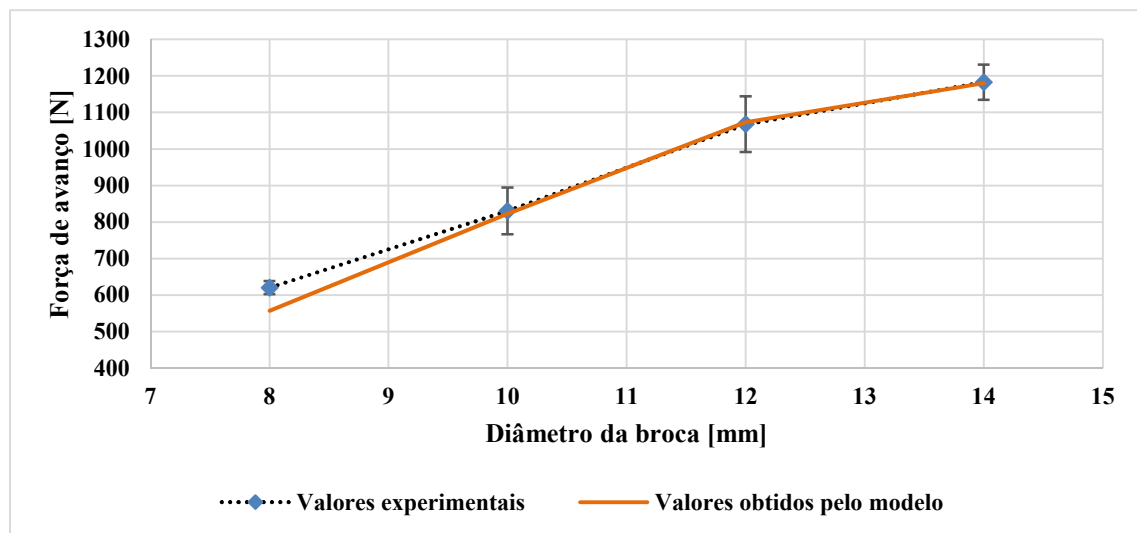


Figura 5-7 – Força de avanço nas arestas de corte

Na representação gráfica pode-se facilmente verificar que o modelo teórico tem uma elevada concordância, apenas na broca de 8 mm é possível observar um pequeno distanciamento entre os pontos obtidos experimentalmente e os pontos obtidos por via de simulação computacional.

Na tabela que se segue apresenta-se a média dos valores experimentais, o respetivo desvio padrão e os valores teóricos simulados para o binário nas arestas de corte.

Tabela 5-8 – Binário nas arestas de corte

Diâmetro da broca [mm]	Média dos valores experimentais [Nm]	Desvio Padrão	Valor Teórico Simulado [Nm]
8	3.95	0,37	3.11
10	6.77	0,13	5.40
12	9.29	0,43	8.35
14	12.47	0,15	11.47

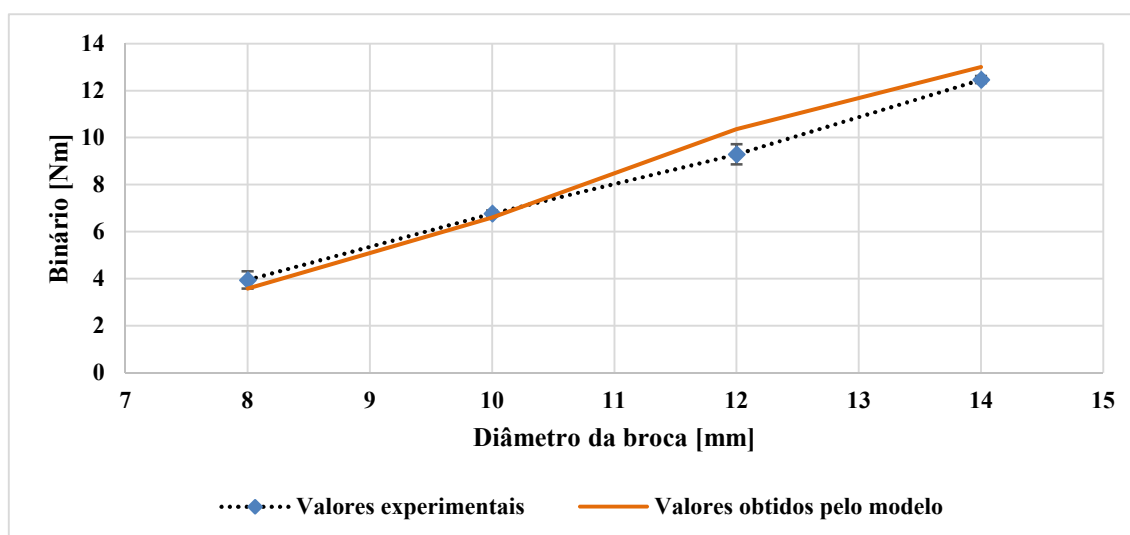


Figura 5-8 – Binário nas arestas de corte

Na Figura 5-8 pode-se ver que nas brocas de 8, 10 e 14 mm os valores teóricos simulados são muito próximos e encontram-se dentro do intervalo de erro correspondente ao desvio padrão, no que diz respeito à broca de 12 mm embora o valor obtido por simulação teórica se encontre fora do intervalo de erro igual ao desvio padrão continua dentro do intervalo de erro de 10% pelo que o valor obtido é aceitável.

5.3 Resultados de força de avanço total e binário total na broca

Na Tabela 5-9 pode-se observar os valores do total da força de avanço desenvolvida pelas brocas ensaiadas, onde o valor teórico da força de avanço e de binário é a soma dos valores obtidos por simulação computacional para a aresta transversal de corte e para as arestas de corte.

Tabela 5-9 – Força de avanço e Binário total

Diâmetro da broca [mm]	Força de axial total Modelo teórico [N]	Força de avanço total experimental [N]	Binário total modelo teórico [Nm]	Binário total experimental [Nm]
8	1367,02	1391,37	3,89	3,97
10	1989,26	1981,13	7,14	7,08
12	2580,80	2665,23	11,20	10,88
14	3024,80	2988,93	14,15	14,22

Pode-se observar graficamente estes resultados nas Figura 5-9 e Figura 5-10.

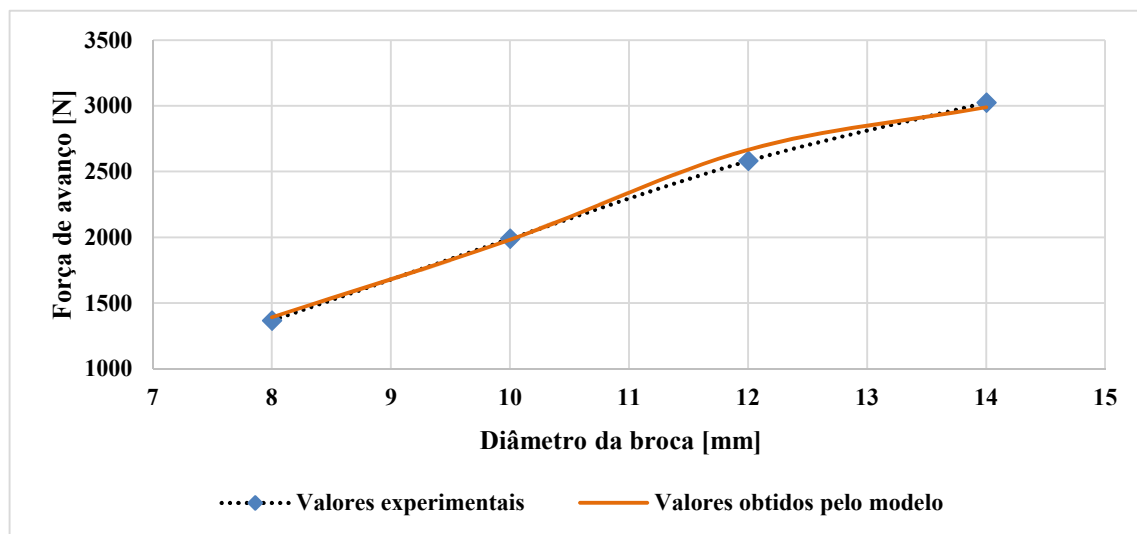


Figura 5-9 – Força de avanço total teórica e força de avanço total experimental

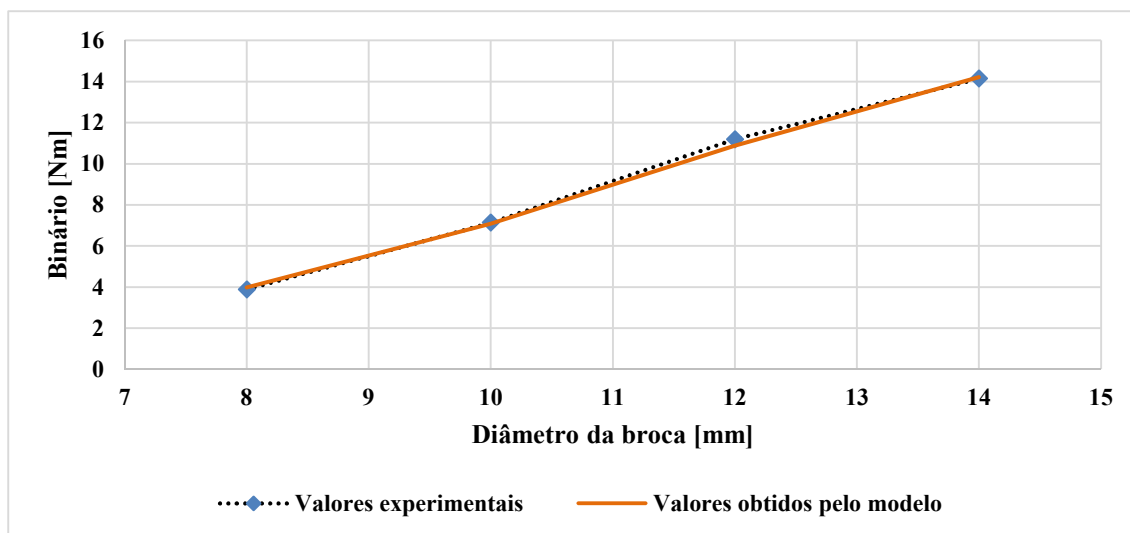


Figura 5-10 – Binário total teórico e binário total experimental

Nas Figura 5-9 e Figura 5-10 pode-se verificar que o modelo teórico possui uma elevada precisão no que diz respeito ao total da força de avanço e binário desenvolvidos durante a furação, os pontos teóricos encontram-se dentro de um intervalo de erro de 5%.

5.4 Avaliação da sensibilidade do modelo ao valor do diâmetro de indentação equivalente

Para se avaliar a sensibilidade do modelo semi-empírico proposto à equação do diâmetro de indentação equivalente (equação (5-2)), variou-se a parcela constante desta e repetiu-se a simulação para a aresta transversal de corte e observou-se o comportamento dos resultados.

Na Tabela 5-10 apresentam-se as modificações da equação do diâmetro de indentação equivalente.

Tabela 5-10 – Modificações à equação do diâmetro de indentação equivalente

Equação do diâmetro de indentação equivalente	$di_{eq} = 0.5225d'$
Parcela constante inferior	$di_{eq} = 0.4d'$
Parcela constante superior	$di_{eq} = 0.6d'$

Nas Figura 5-11 e Figura 5-12 pode-se observar o comportamento provocado por variações de décimas de milímetro nas curvas de força de avanço e de binário calculados pelo modelo proposto.

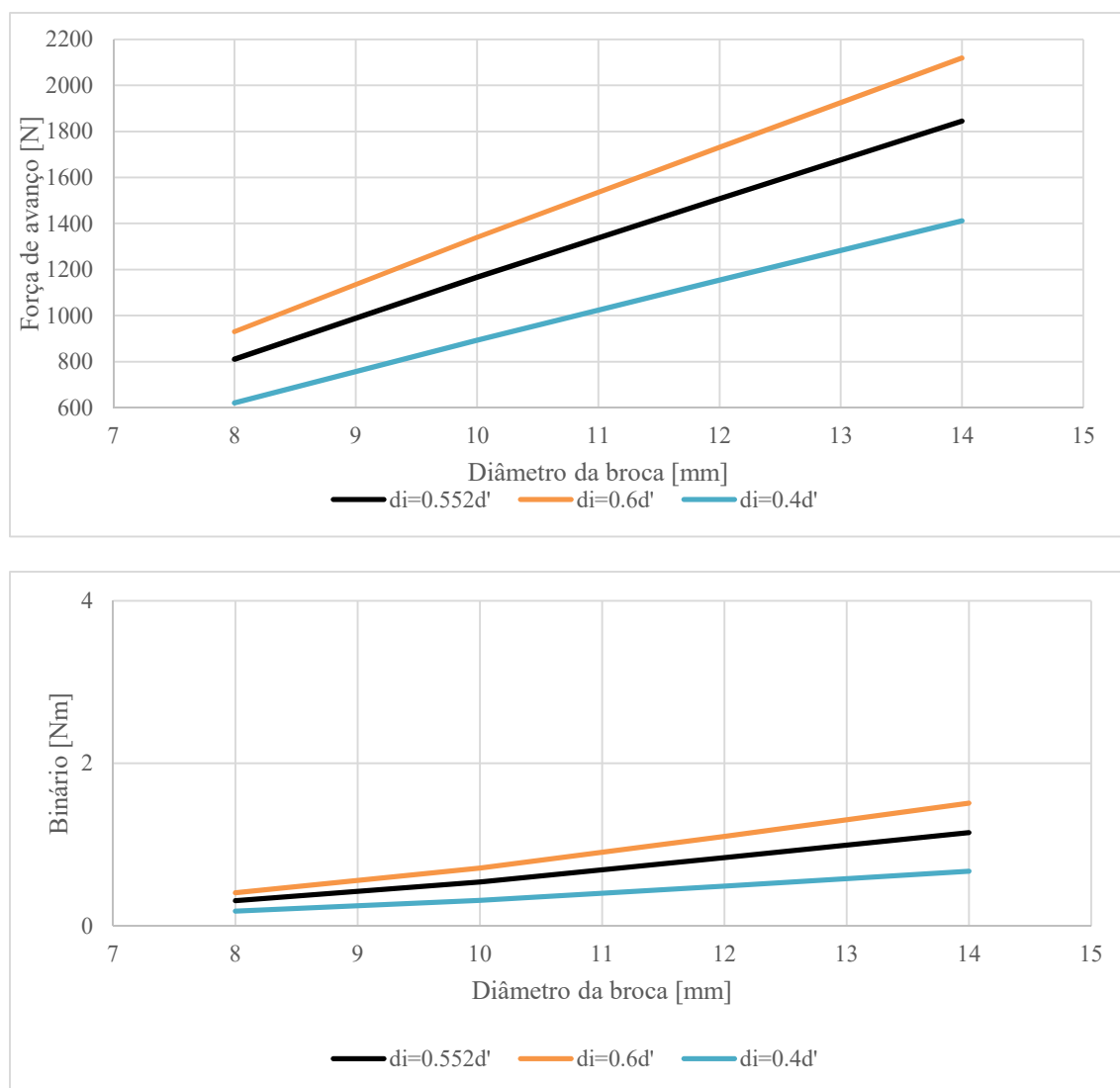


Figura 5-11 - Variação de resultados na aresta transversal de corte

Relativamente ao binário, devido à geometria da broca na aresta transversal de corte, a variação da equação (5-2) apenas surte em ligeiras alterações, visto que nesta zona os valores do binário são muito baixos devido ao diminuto raio à força de corte. No que diz respeito à força de avanço, uma vez na aresta transversal de corte contribui com mais de 50% da força de avanço total, pequenas variações na equação do diâmetro de indentação equivalente tornam-se naturalmente mais acentuadas.

Previsivelmente estas variações observadas nas figuras acima, significam uma variação nos valores da força de avanço e binário total, Figura 5-12.

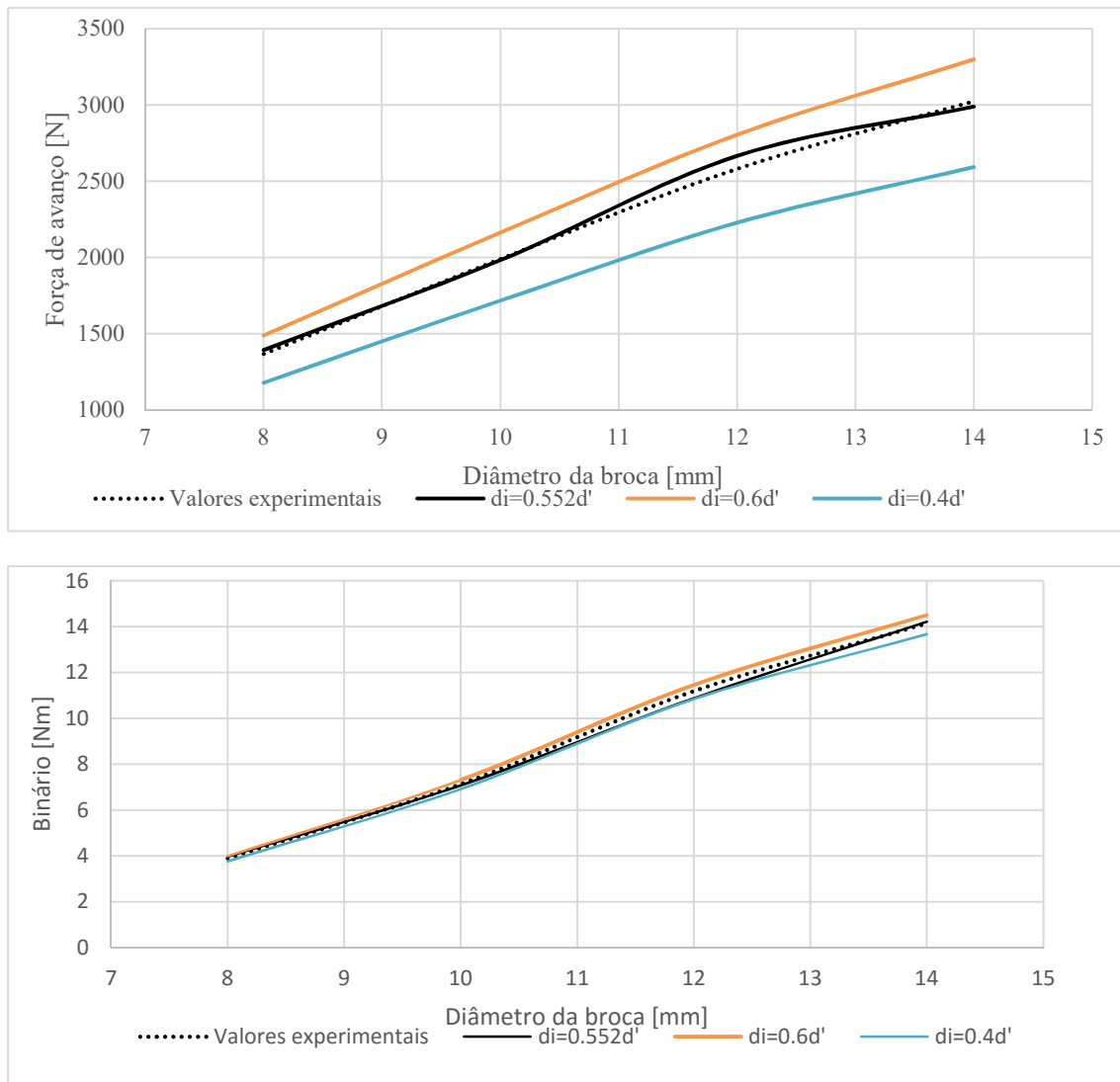


Figura 5-12 - Variação dos resultados nos valores totais

Pelos resultados acima apresentados, pode-se então afirmar que a equação (5-2) influencia significativamente os resultados previstos pelo modelo teórico, no entanto podemos constatar que a equação se encontra bastante próxima do ideal pois ao variar a parcela constante verifica-se que os valores se afastam consideravelmente dos valores experimentais no que diz respeito à força de avanço total.

Mais uma vez se pode observar que os valores do binário são pouco influenciados por esta equação pela mesma razão já indicada na zona da aresta transversal de corte. No entanto para se avaliar se esta equação adapta ao modelo proposto para previsão de força de avanço e de binário seria necessário proceder a uma segunda fase de experimentação onde se estabelece que a dimensão do pré-furo é determinada pela equação (5-2).

Através desta fase de experimentação poder-se-ia verificar também, se o restante comprimento da aresta de corte (fora do diâmetro de indentação equivalente) tem uma influência significativa ou não na força de avanço e no binário na zona da aresta transversal de corte, garantindo um dos pressupostos fundamentais da presente dissertação: o diâmetro de indentação é apenas uma fração do comprimento da aresta transversal de corte.

Conclusões e sugestão de trabalhos futuros

6.1 Conclusões e contribuições

O estudo conduzido nesta dissertação teve como principal objetivo desenvolver um modelo semi-empírico que permita prever a força de avanço e binário a que as brocas helicoidais ficam sujeitas durante o processo de furação.

Com o intuito de cumprir o objetivo traçado, desenvolveu-se um conjunto de ensaios experimentais de modo a se conseguir avaliar a força de avanço e binário em duas zonas de corte das brocas: zona da aresta transversal de corte e zona das arestas de corte.

Os ensaios com furação a cheio permitiram recolher valores de força de avanço e de binário desenvolvidos por todos os elementos da broca, cortantes e não cortantes. Nos ensaios com pré furo os resultados obtidos dizem respeito aos valores de força de avanço e de binário nas arestas de corte. Os valores da zona da aresta transversal de corte são obtidos posteriormente através da subtração dos valores obtidos nos ensaios de furação com pré-furo aos valores obtidos nos ensaios com furação a cheio.

As principais conclusões são:

- ⇒ Estabeleceu-se a equação que permite calcular o diâmetro de indentação equivalente em função do comprimento da aresta transversal de corte;
- ⇒ Foram definidos os modelos analíticos ajustados com um fator determinado experimentalmente que permitem prever a força de avanço e binário durante o processo de furação;
- ⇒ Verificou-se que o modelo proposto pode ser ajustado com as características geométricas das brocas.

6.2 Sugestão para trabalhos futuros

Durante a investigação apresentada neste trabalho alguns aspetos foram identificados permitem uma melhoria do modelo proposto, sendo estas:

- ⇒ A realização de um maior número de ensaios para cada quantidade e geometria de broca, para verificação da repetibilidade;
- ⇒ Ensaios com materiais diferentes, nomeadamente alumínio e aço inoxidável;
- ⇒ Ensaiar brocas com diferentes geometrias de ponta para se verificar a adaptabilidade do modelo.

Referências bibliográficas

- [1] H. K. Tönshoff, W. Spintig, W. König, and A. Neises, “Machining of holes developments in drilling technology,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 43, no. 2, pp. 551–561, 1994.
- [2] J. . Strenkowski, C. . Hsieh, and a. . Shih, “An analytical finite element technique for predicting thrust force and torque in drilling,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 44, no. 12–13, pp. 1413–1421, Oct. 2004.
- [3] J. J. P. Teixeira, *Fundamentos físicos do corte dos metais*. Lisboa: Edinova, 2001, ISBN 972595100-X.
- [4] DORMER, *Manual técnico*. 2013.
- [5] A. Paul, S. G. Kapoor, and R. E. Devor, “Chisel edge and cutting lip shape optimization for improved twist drill point design,” vol. 45, pp. 421–431, 2005.
- [6] L. M. Kachanov, *Fundamental of the theory of plasticity*, 1st ed. Mir Publishers, 1974.
- [7] A. Paul, S. G. Kapoor, and R. E. DeVor, “A chisel edge model for arbitrary drill point geometry,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 127, no. 1, p. 23, 2005.
- [8] K. Sambhav, P. Tandon, and S. G. Dhande, “Force modeling for generic profile of drills,” vol. 136, no. August, pp. 1–9, 2014.
- [9] J. A. Yang, V. Jaganathan, and R. Du, “A new dynamic model for drilling and reaming processes,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 42, no. 2, pp. 299–311, 2002.
- [10] Y. Gong, C. Lin, and K. F. Ehmann, “Dynamics of initial penetration in drilling: part 1—mechanistic model for dynamic forces,” *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 127, no. 2, p. 280, 2005.
- [11] Y. Gong, C. Lin, and K. F. Ehmann, “Dynamics of initial penetration in drilling: part 2 — motion models for drill skidding and wandering with experimental verification,” vol. 127, no. May 2005, pp. 289–297, 2005.
- [12] M. Pirtini and I. Lazoglu, “Forces and hole quality in drilling,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 45, no. 11, pp. 1271–1281, Sep. 2005.
- [13] O. Blăjină, A. Vlase, and B. Vlase, “The Calculus relations of the cutting forces and moments for drilling of the steel X2CRNIMO18-14-3,” vol. 9, no. 1, pp. 12–17, 2011.
- [14] C. Lin, S. K. Kang, and K. F. Ehmann, “Helical micro-drill point design and grinding,” vol. 117, no. August 1995, 2014.
- [15] A. Makhecha, A. R. Thangaraj, and John W. Sutherland, “Prediction of a drilling thrust and torque using a mechanistic model calibrated through non-linear optimization,” *Manuf. Sci. Engineering*, vol. 68, no. 1, pp. 237–244, 1994.
- [16] D. F. Galloway, “Some experiments on the influence of various factors on drill performance,” *Trans. ASME*, vol. 79, no. 2, pp. 191–231, 1957.
- [17] M. Elhachimi, S. Torbaty, and P. Joyot, “Mechanical modelling of high speed drilling. 1: predicting torque and thrust,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 39, no. 4, pp. 553–568,

1999.

- [18] M. Elhachimi, S. Torbaty, and P. Joyot, “Mechanical modelling of high speed drilling. 2: predicted and experimental results,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 39, no. 4, pp. 569–581, 1999.
- [19] P. L. B. Oxley, “Modelling machining processes with a view to their optimization and to the adaptative control of metal cutting machine tools,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 4, no. 1/2, pp. 103–109, 1988.
- [20] R. A. Williams, “A Study of the drilling process,” *J. Eng. Ind.*, no. November 1974, pp. 1207–1215, 1974.

Código Matlab

Diâmetro de indentação

```
syms m

%f - Velocidade de avanço da broca,
%Fa - Força de Avanço da broca obtida experimentalmente,
%K - Tensão de corte crítica,
%p - Metade do ângulo da ponta da broca,
%gamma - Ângulo de ataque,
%L - Ângulo auxiliar,
%di - Diâmetor de indentação.
%
f=;
Fa=;
%
K=510;
p=degtorad(59);
Y=degtorad(126);
gamma=-atan(tan(p)*cos(pi-Y));
PHI=solve((2*gamma)==m+(acos(tan((pi/4)-(m/2))))),m);
L=double(PHI);
di=(Fa*(cos(gamma)-sin(gamma-L)))/(4*K*(1+L)*f*sin(gamma));
disp(di);
```

Diâmetro de indentação equivalente, força de avanço e binário na aresta transversal de corte

```
syms m
%f - Velocidade de avanço da broca,
%c - Comprimento da aresta transversal de corte
%K - Tensão de corte crítica,
%p - Metade do ângulo da ponta da broca,
%gamma - Ângulo de ataque,
%L - Ângulo auxiliar,
%DI - Diâmetro de indentação equivalente
%FA - Força de avanço em função Diâmetro Equivalente
%B - Binário em função Diâmetro Equivalente
%Inputs_____
f=;
c=;
%
K=510;
p=degtorad(59);
Y=degtorad(126);
gamma=-atan(tan(p)*cos(pi-Y));
PHI=solve((2*gamma)==m+(acos(tan((pi/4)-(m/2))))),m);
L=double(PHI);
DI=0.0171*(c^2)+0.4874*c;
disp(DI);
FA=(4*K*DI*(1+L)*f*sin(gamma))/((cos(gamma)-sin(gamma-L)));
disp(FA);
B=((2*K*(DI^2)*(1+L)*f*sin(gamma))/((cos(gamma)-sin(gamma-L))))/1000;
disp(B);
```

Força de avanço nas arestas de corte

```
function [Fa]=FaArestas(r)
%t - Metade da distância entre arestas de corte
%d - Diâmetro da broca
%f - Velocidade do avanço
%DELTHA - Ângulo de hélice na periferia
%n - Coeficiente de encruamento
%sigmar - Tensão de rotura
%w - Ângulo ómega
%i - Ângulo de inclinação
%xi - Projeção axial do angulo ómega
%deltha - Angulo de hélice no ponto M
%gammar - Angulo auxiliar
%gamman - Angulo de ataque normal
%bethan - Angulo de atrito normal
%phin - Angulo de ataque normal
%gammas - distorção da apara
%kab - Tensão de corte no plano de corte
%tethan - Angulo auxiliar
%Fa - Força de avanço
%
t=/2;
d=;
f=;
%
p=degtorad(59);
DELTHA=degtorad(32);
A=degtorad(28.15);
n=0.3;
sigmar=770;
w=asin(t/r);
i=asin(sin(w)*sin(p));
xi=atan(tan(w)*cos(p));
deltha=atan((d/(2*r))*tan(DELTHA));
gammar=atan((tan(deltha)*cos(w))/(sin(p)-cos(p)*tan(deltha)*sin(w)));
```



```

gamman=gammar-xi;
bethan=A+(gamman/2);
phin=(pi/4)+((gamman-bethan)/2);
gammas=cos(gamman)/(sin(phin)*cos(phin-gamman));
kab=0.74*sigmar*(gammas^n);
tethan=phin+bethan-gamman;
Fa=2*((kab*((f*sin(p)*cos(xi)))/(2*sin(phin)*cos(tethan)))*(cos(phin-
gamman-i)*((r^2)/(((r^2)-(t^2))^(1/2)))));

```

Rotina de integração para força de avanço nas arestas de corte

```

function simpsarestas(d, chisel)
a=chisel/2;
b=d/2;
n=1000000;
h = (b-a)/n;
sum_even = 0;
for i = 1:n/2-1
    x(i) = a + 2*i*h;
    sum_even = sum_even + f(x(i));
end
sum_odd = 0;
for i = 1:n/2
    x(i) = a + (2*i-1)*h;
    sum_odd = sum_odd + f(x(i));
end
integral = (h*(f(a)+ 2*sum_even + 4*sum_odd +f(b)))/3)
function y = f(x);
y = FaArestas(x);

```

Binário nas arestas de corte

```
function [B]=BinarioArestas(r)
%t - Metade da distância entre arestas de corte
%d - Diâmetro da broca
%f - Velocidade do avanço
%DELTHA - Ângulo de hélice na periferia
%n - Coeficiente de encruamento
%sigmar - Tensão de rotura
%w - Ângulo ómega
%i - Ângulo de inclinação
%xi - Projeção axial do angulo ómega
%deltha - Angulo de hélice no ponto M
%gammar - Angulo auxiliar
%gamman - Angulo de ataque normal
%bethan - Angulo de atrito normal
%phin - Angulo de ataque normal
%gammas - distorção da apara
%kab - Tensão de corte no plano de corte
%tethan - Angulo auxiliar
%B - Binário
t=/2;
d=;
f=;
%
p=degtorad(59);
DELTHA=degtorad(32);
A=degtorad(28.15);
n=0.3;
sigmar=770;
w=asin(t/r);
i=asin(sin(w)*sin(p));
xi=atan(tan(w)*cos(p));
deltha=atan((d/(2*r))*tan(DELTHA));
gammar=atan((tan(deltha)*cos(w))/(sin(p)-cos(p)*tan(deltha)*sin(w)));
gamman=gammar-xi;
bethan=A+(gamman/2);
phin=(pi/4)+(gamman-bethan)/2;
gammas=cos(gamman)/(sin(phin)*cos(phin-gamman));
```

```

kab=0.74*sigmar*(gammas^n);
tethan=phin+bethan-gamman;
B=2*((kab*((f*sin(p)*cos(xi))))/(2*sin(phin)*cos(tethan)))*(cos(phin-
gamman-i))*((r^2)/(((r^2)-(t^2))^(1/2)));

```

Rotina de integração para o binário nas arestas de corte

```

function simpsarestas(d, chisel)
a=chisel/2;
b=d/2;
n=1000000;
h = (b-a)/n;
sum_even = 0;
for i = 1:n/2-1
    x(i) = a + 2*i*h;
    sum_even = sum_even + f(x(i));
end
sum_odd = 0;
for i = 1:n/2
    x(i) = a + (2*i-1)*h;
    sum_odd = sum_odd + f(x(i));
end
integral = (h*(f(a)+ 2*sum_even + 4*sum_odd +f(b))/3)/1000
function y = f(x);
y = BinarioArestas(x);

```

Resultados Experimentais

Resultados obtidos para as brocas de 8 mm

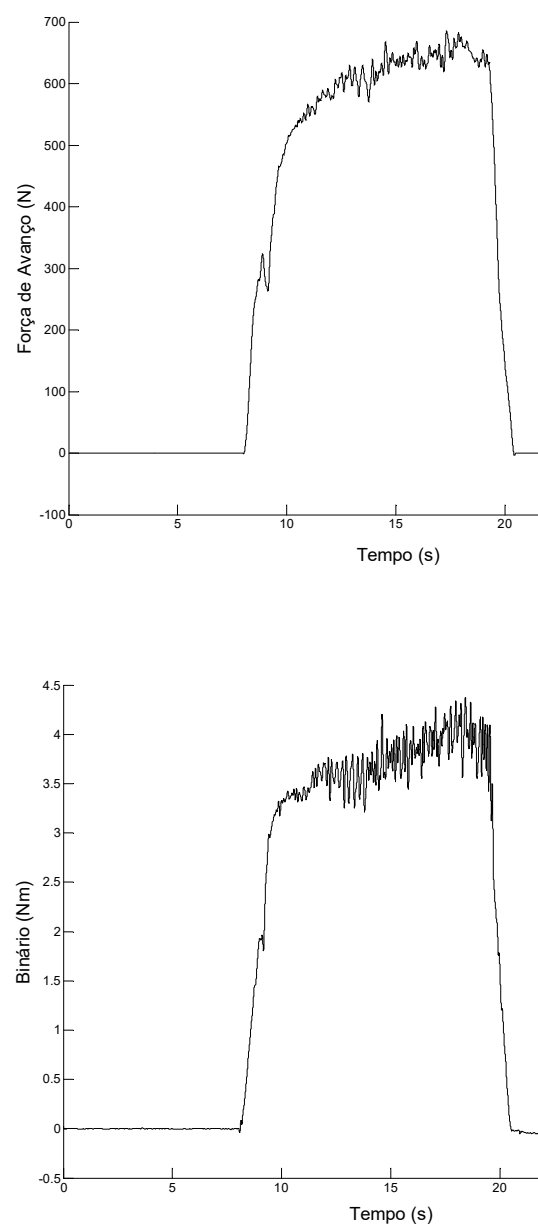


Figura C. 1 - Força de avanço e binário na broca 8.1 (pré-furo)

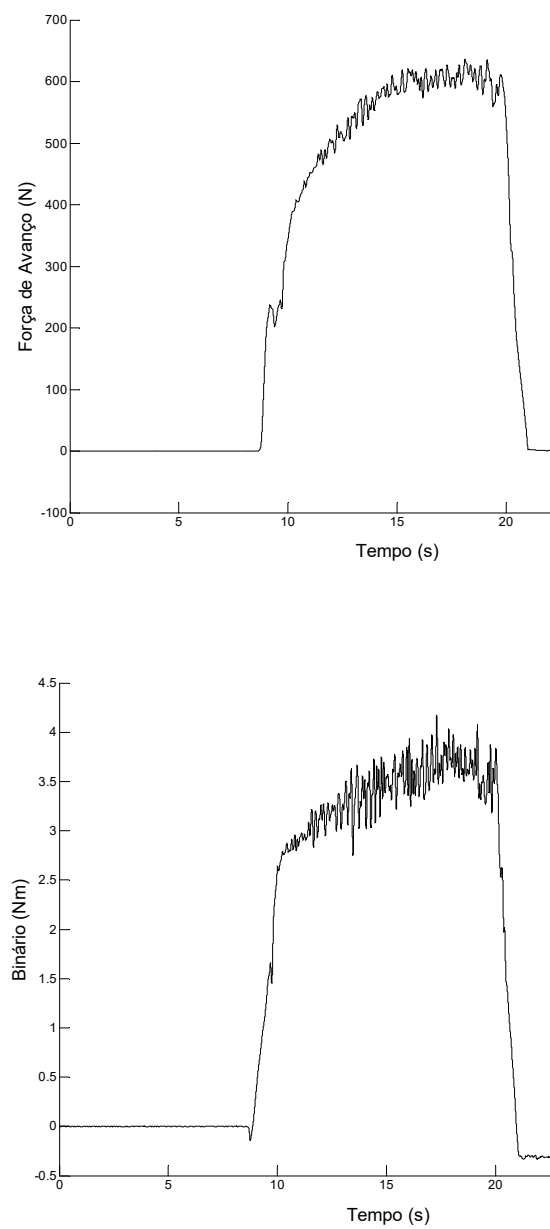


Figura C. 2 - Força de avanço e binário na broca 8.2 (pré-furo)

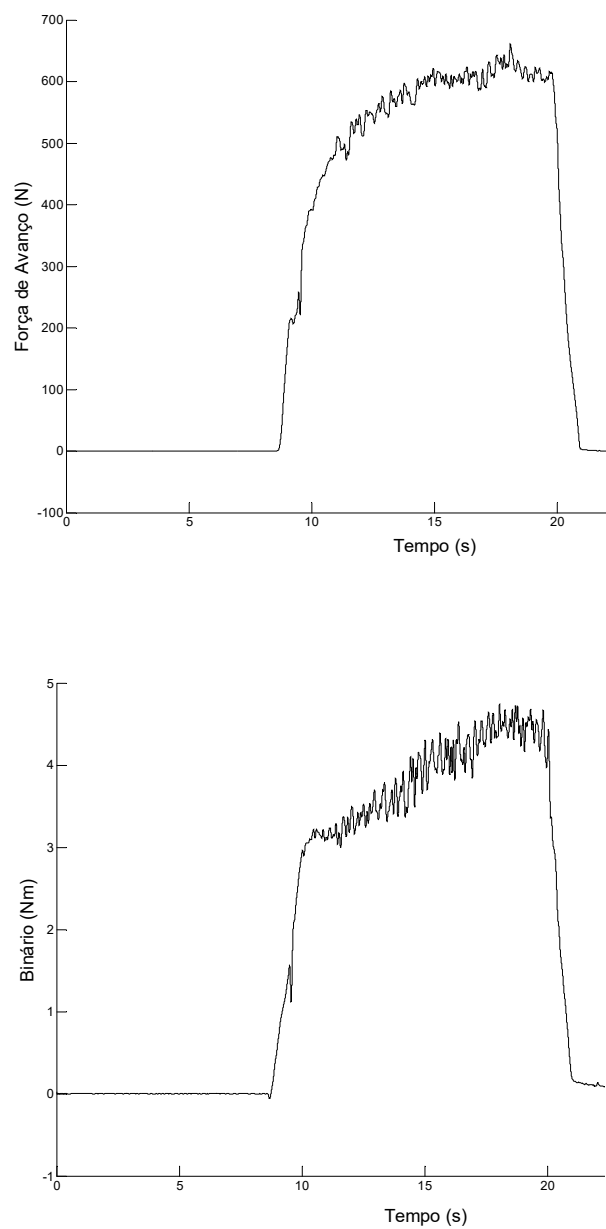


Figura C. 3 - Força de avanço e binário na broca 8.3 (pré-furo)

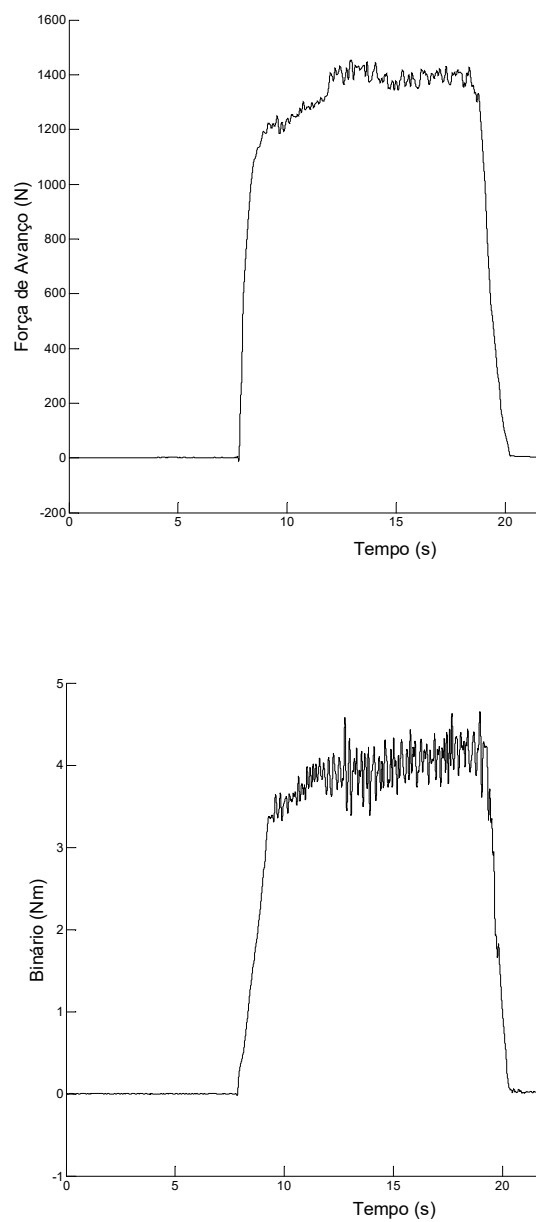


Figura C. 4 - Força de avanço e binário na broca 8.4 (furo a cheio)

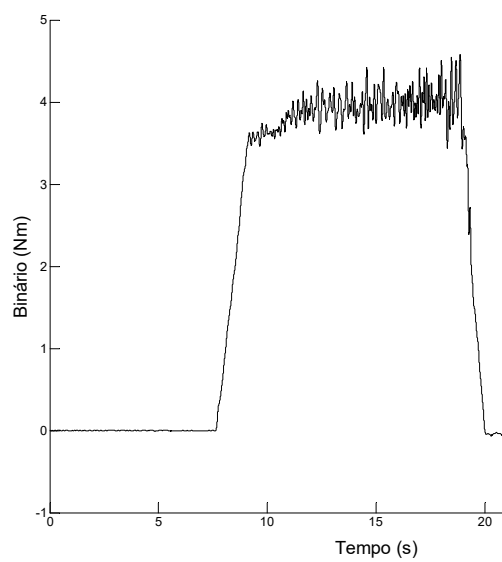
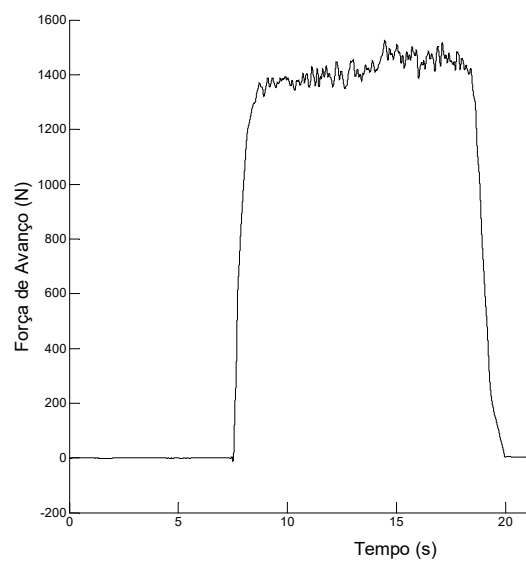


Figura C. 5 - Força de avanço e binário na broca 8.5 (furo a cheio)

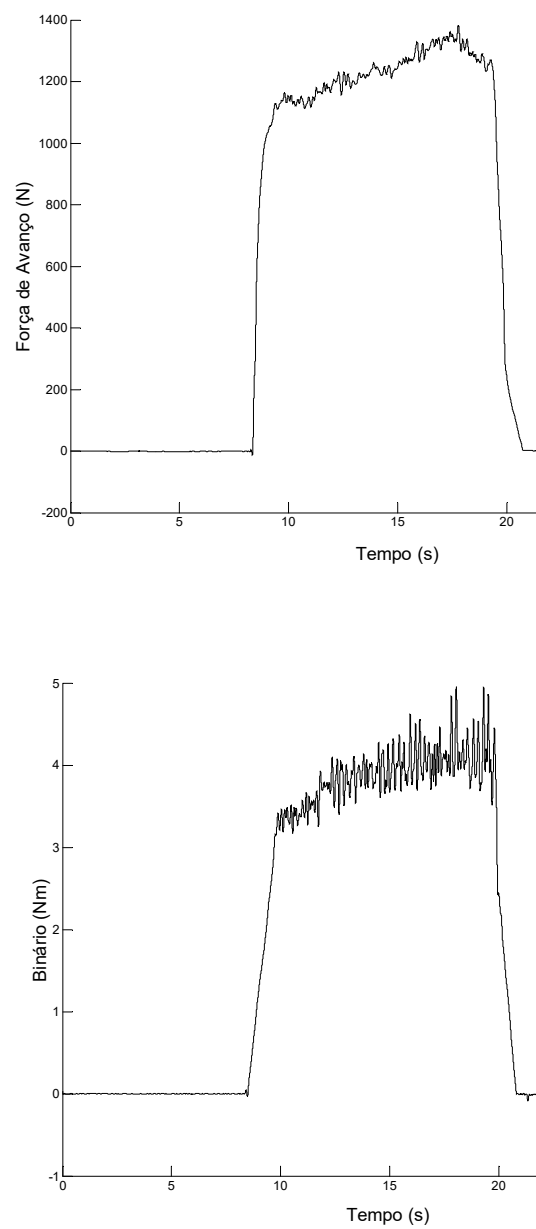


Figura C. 6 - Força de avanço e binário na broca 8.6 (furo a cheio)

Resultados obtidos para as brocas de 10mm

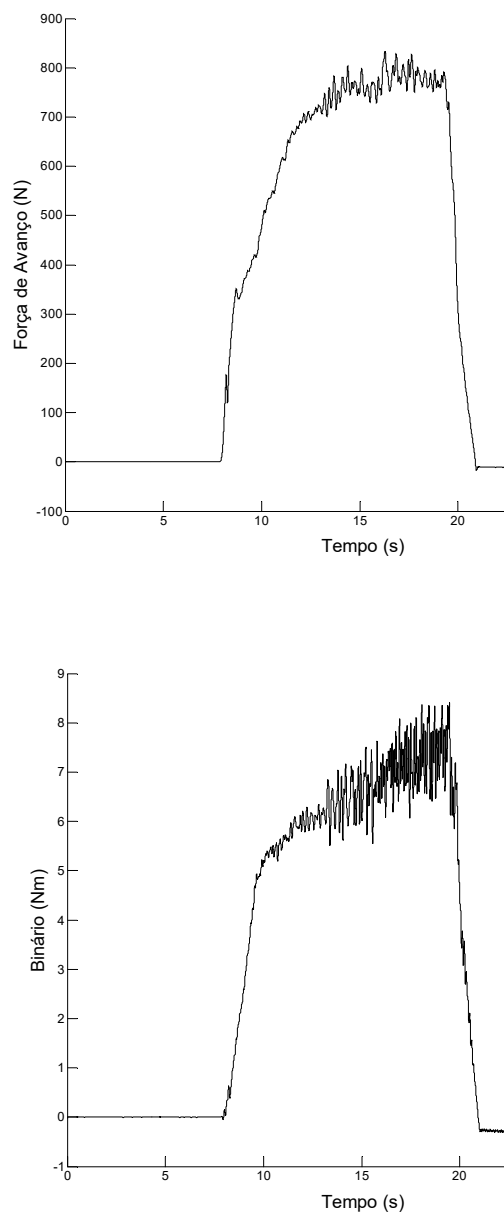


Figura C. 7 - Força de avanço e binário na broca 10.1 (pré-furo)

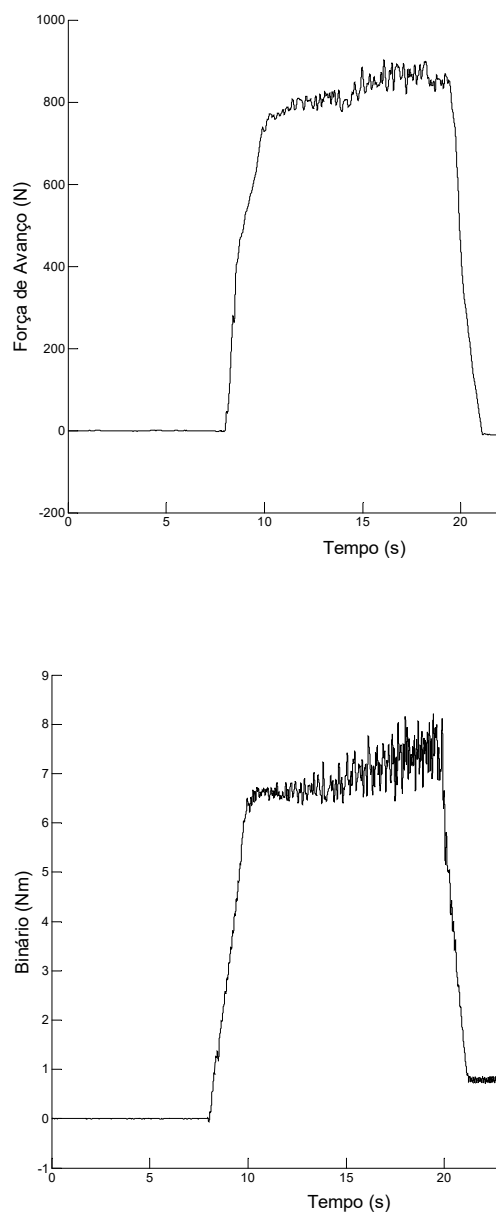


Figura C. 8 - Força de avanço e binário na broca 10.2 (pré-furo)

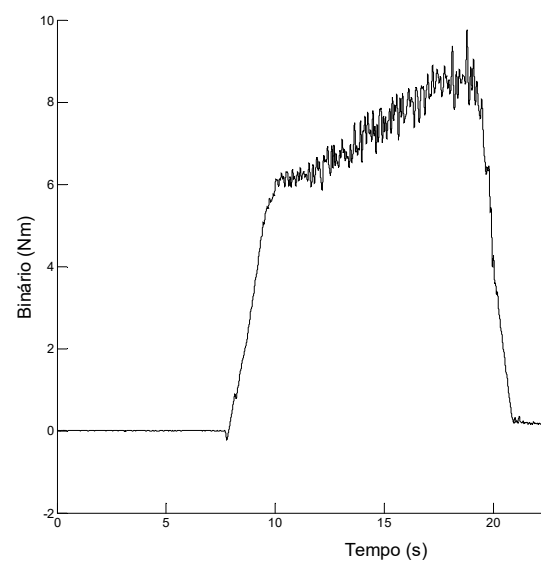
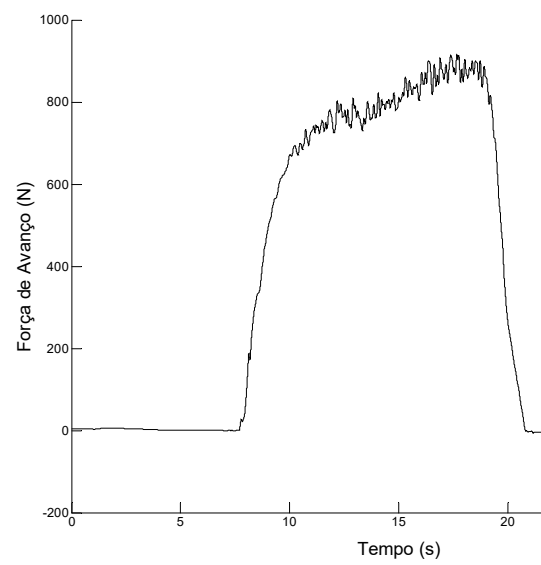


Figura C. 9 - Força de avanço e binário na broca 10.3 (pré-furo)

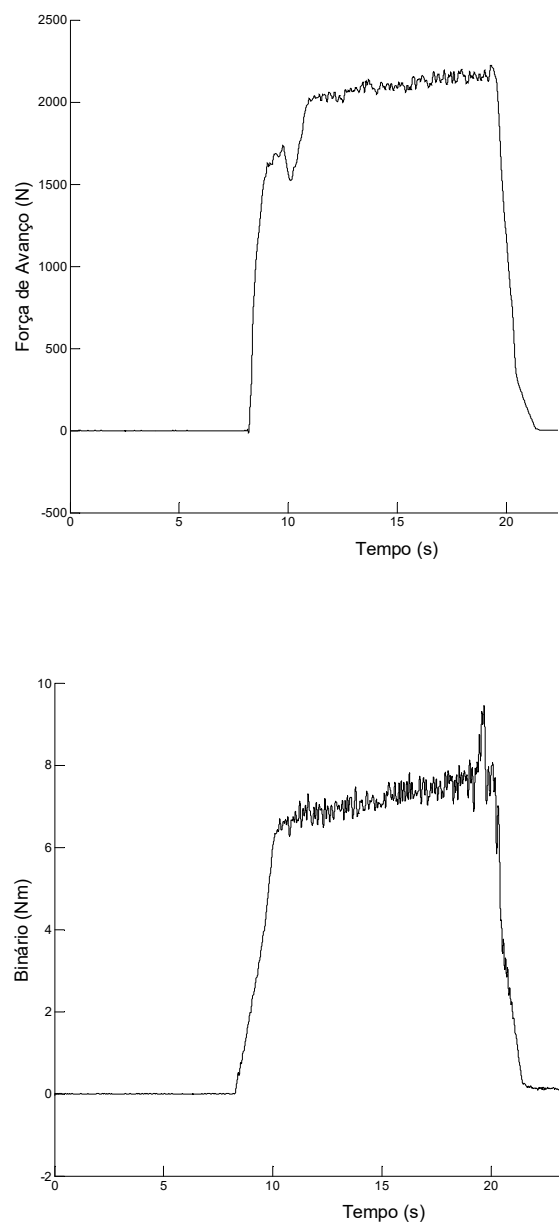


Figura C. 10 - Força de avanço e binário na broca 10.4 (furo a cheio)

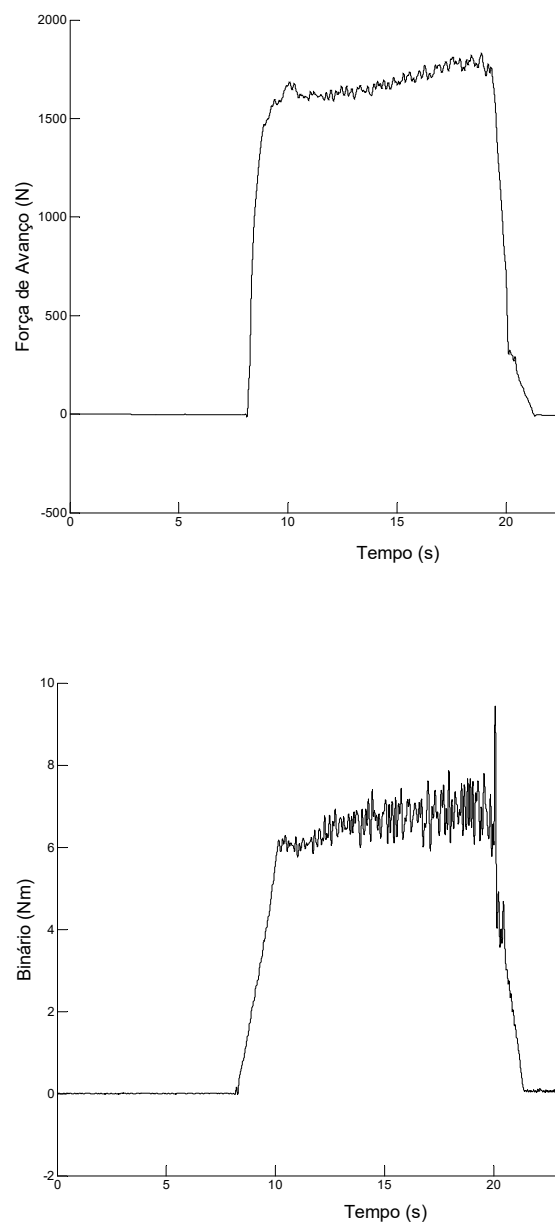


Figura C. 11 - Força de avanço e binário na broca 10.5 (furo a cheio)

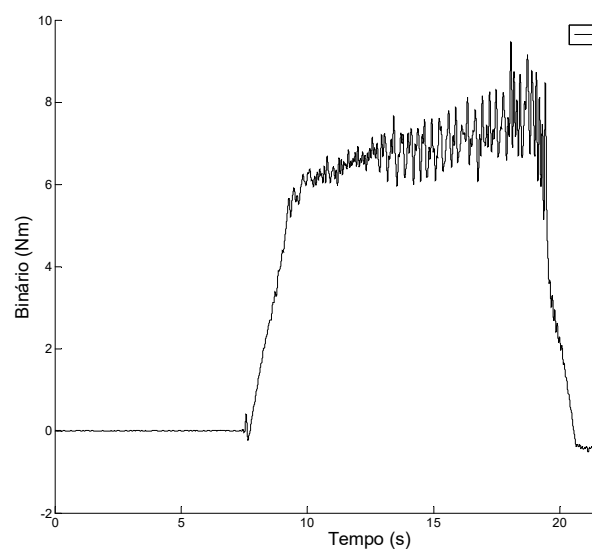
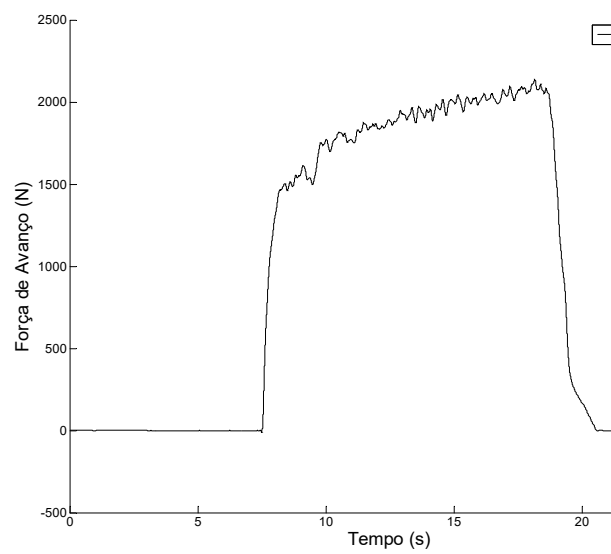


Figura C. 12 - Força de avanço e binário na broca 10.6 (furo a cheio)

Resultados obtidos para as brocas de 12 mm

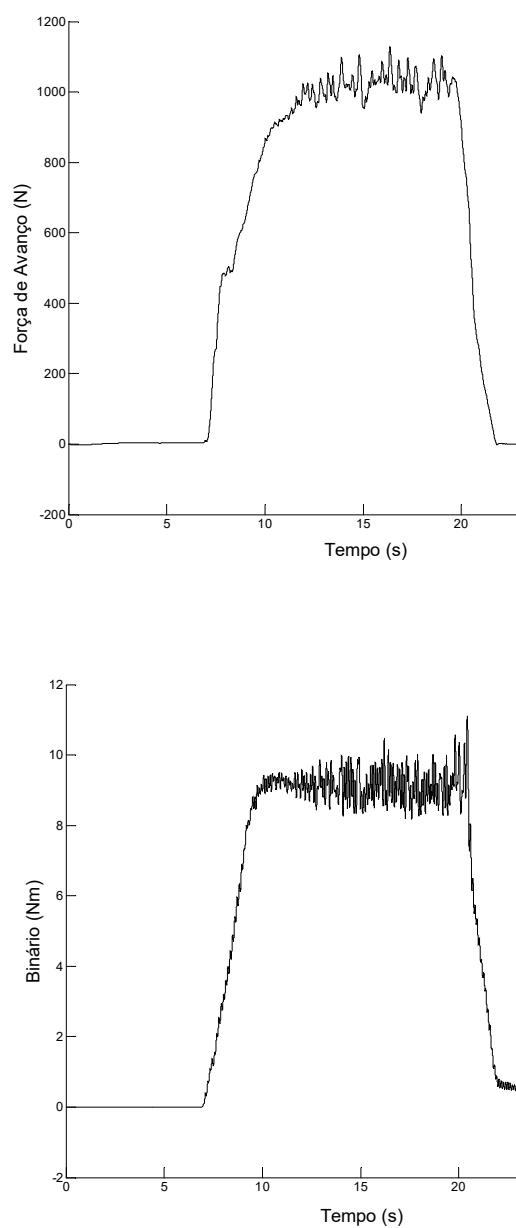


Figura C. 13 - Força de avanço e binário na broca 12.1 (pré-furo)

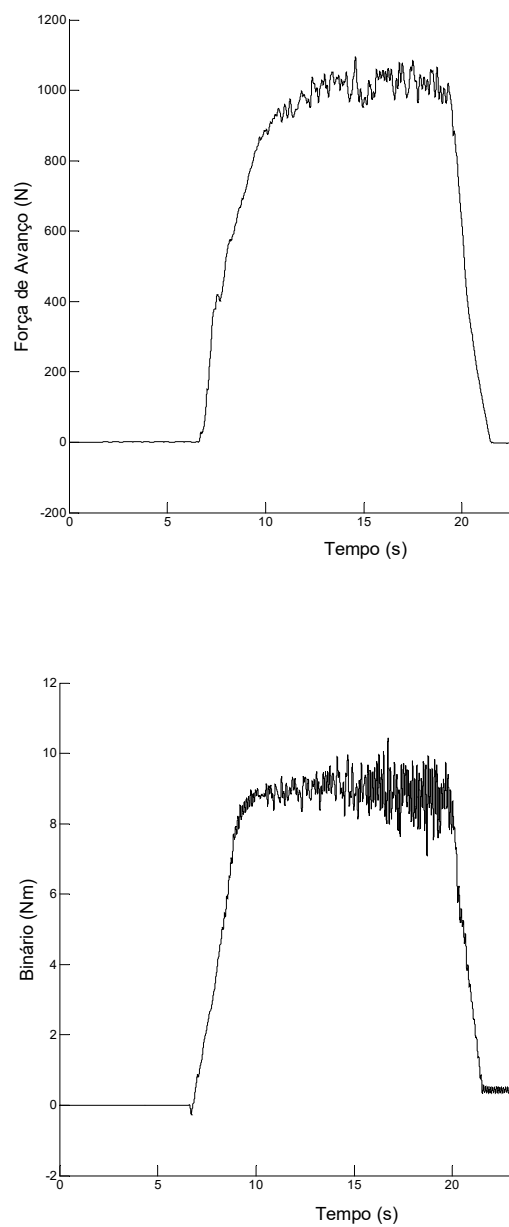


Figura C. 14 - Força de avanço e binário na broca 12.2 (pré-furo)

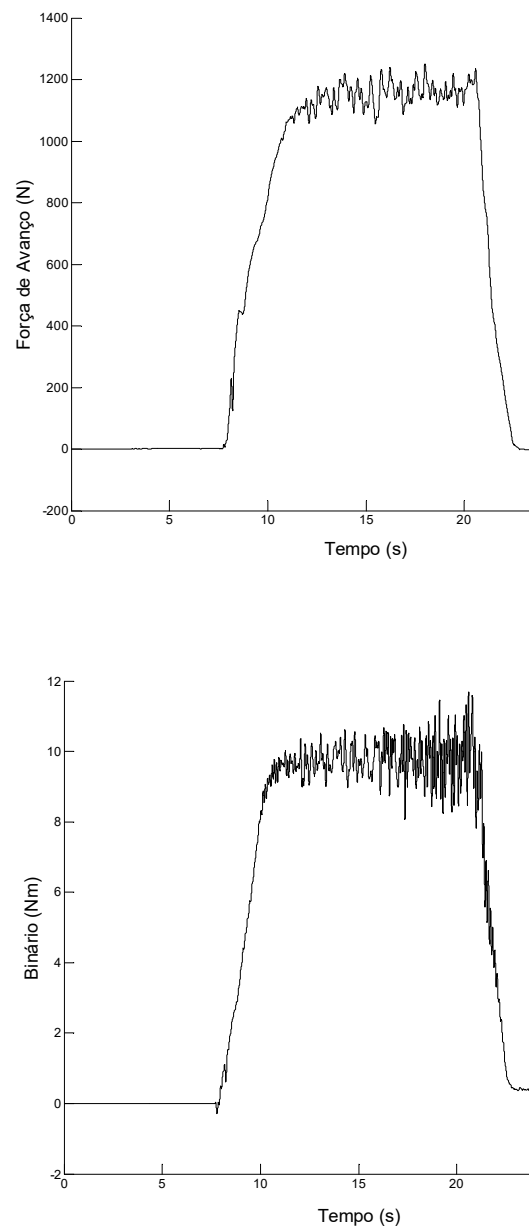


Figura C. 15 - Força de avanço e binário na broca 12.3 (pré-furo)

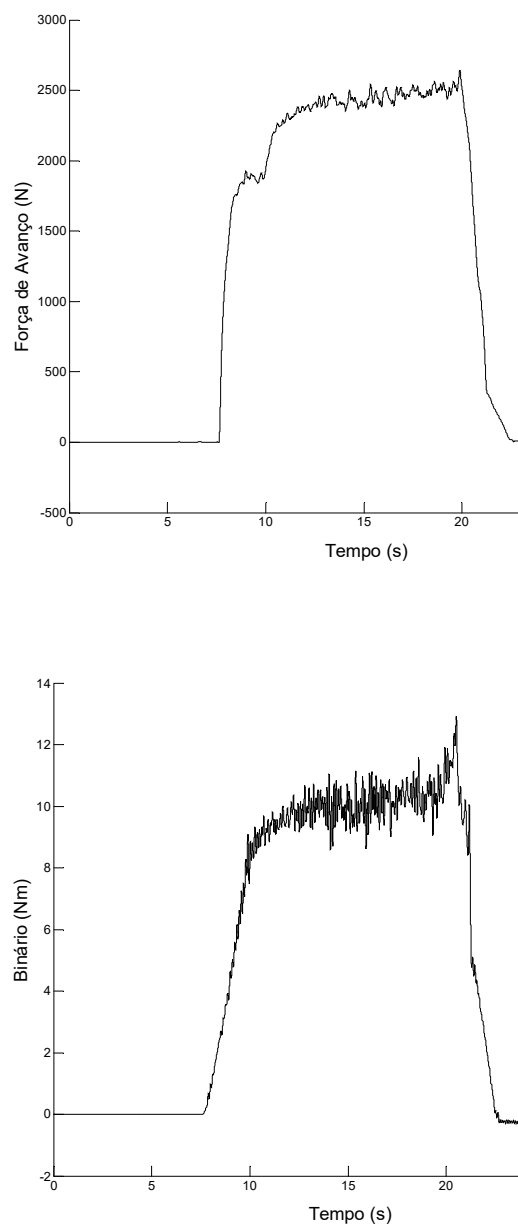


Figura C. 16 - Força de avanço e binário na broca 12.4 (furo a cheio)

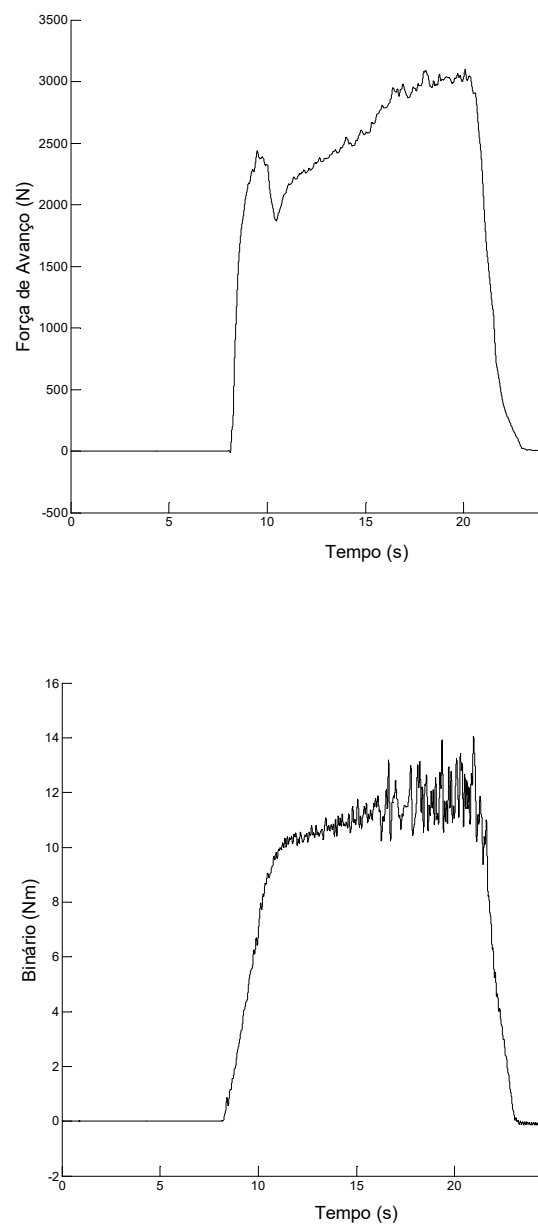


Figura C. 17 - Força de avanço e binário na broca 12.5 (furo a cheio)

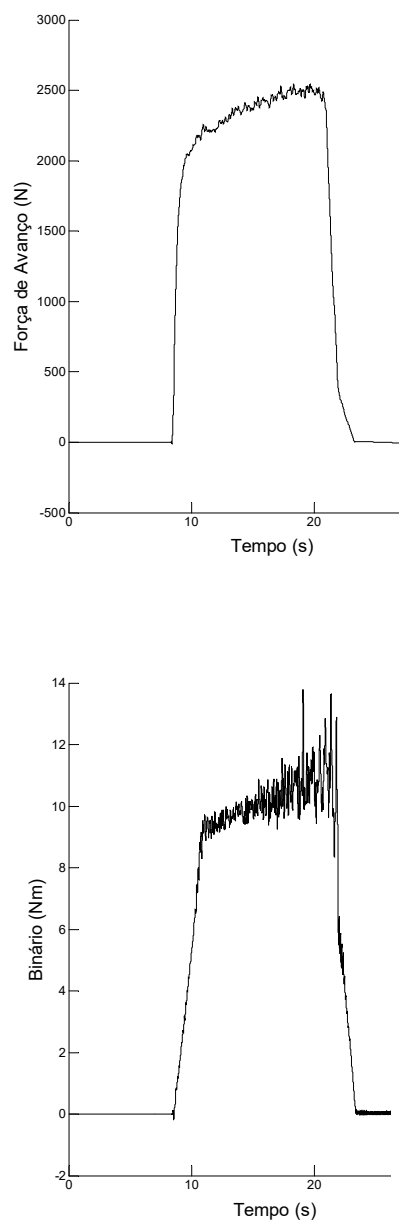


Figura C. 18 - Força de avanço e binário na broca 12.6 (furo a cheio)

Resultados obtidos para as brocas 14 mm

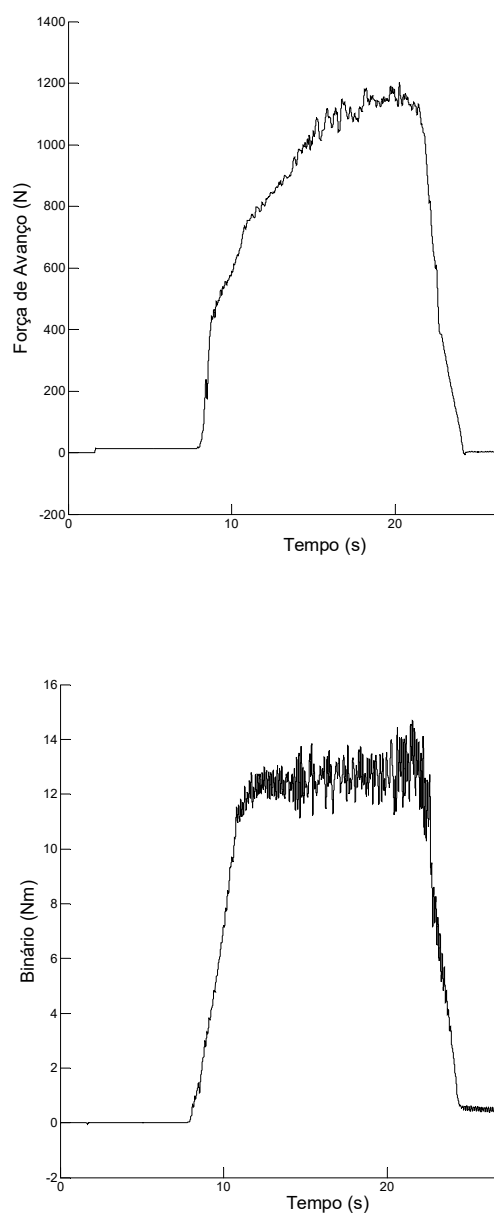


Figura C. 19 - Força de avanço e binário na broca 14.1 (pré-furo)

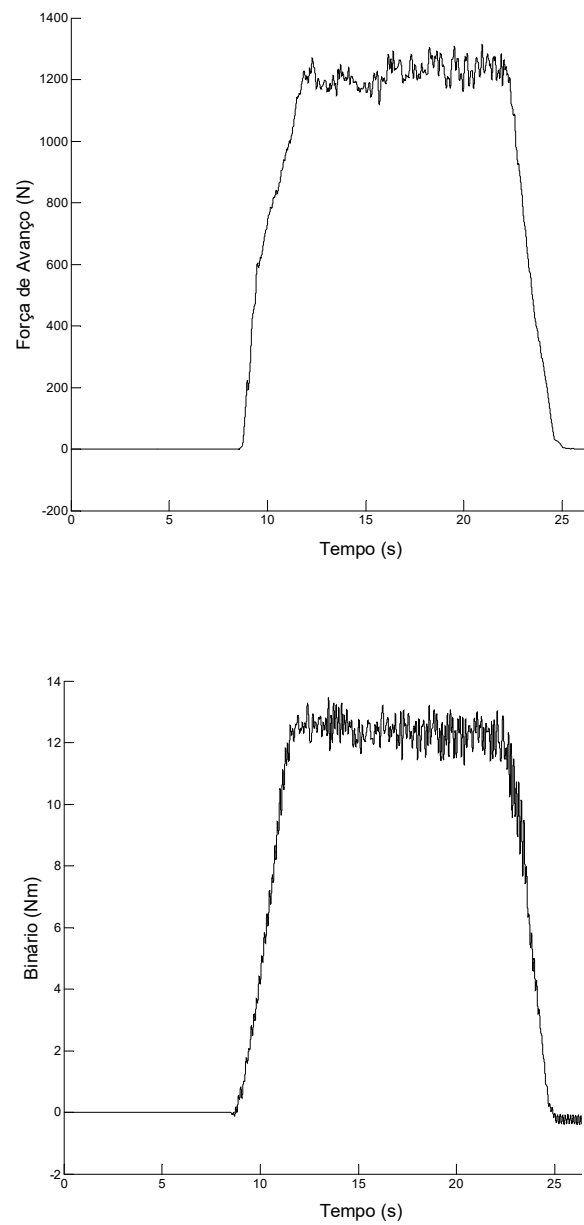


Figura C. 20 - Força de avanço e binário na broca 14.2 (pré-furo)

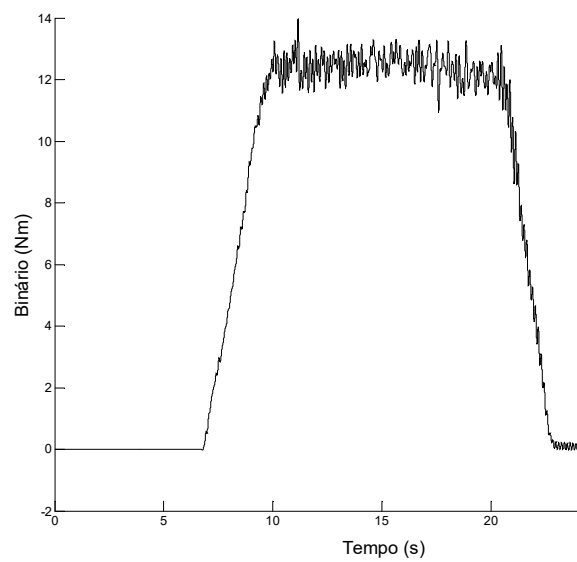
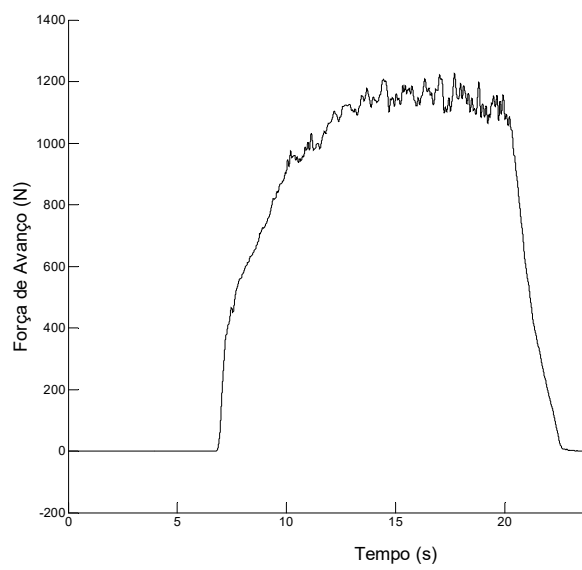


Figura C. 21 - Força de avanço e binário na broca 14.3 (pré-furo)

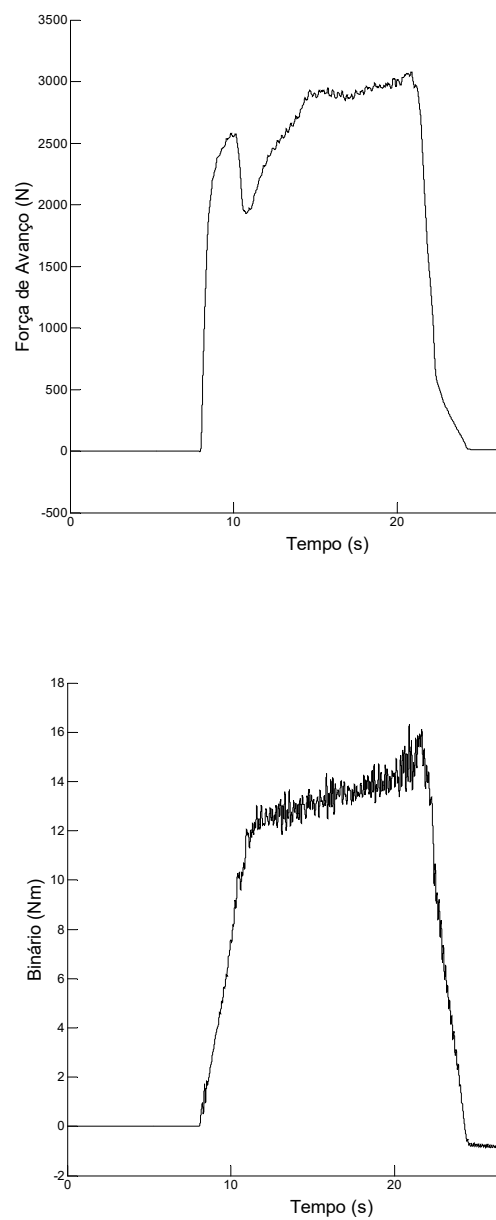


Figura C. 22 - Força de avanço e binário na broca 14.4 (furo a cheio)

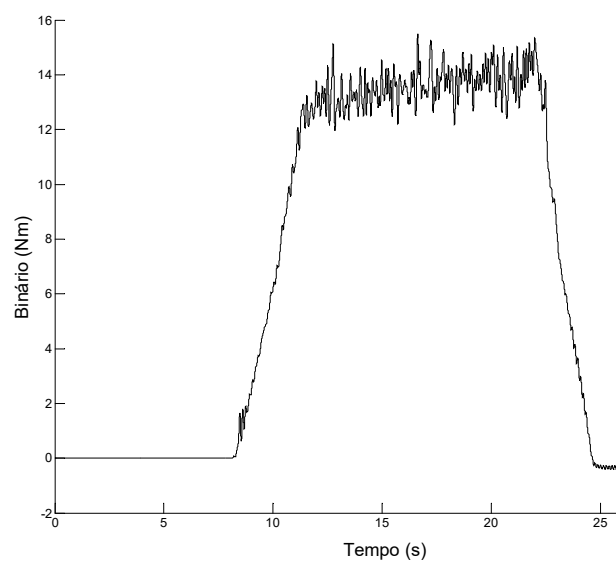
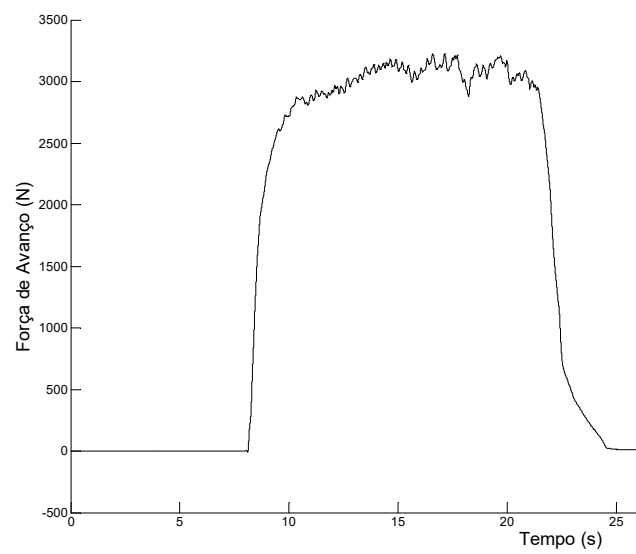


Figura C. 23 - Força de avanço e binário na broca 14.5 (furo a cheio)

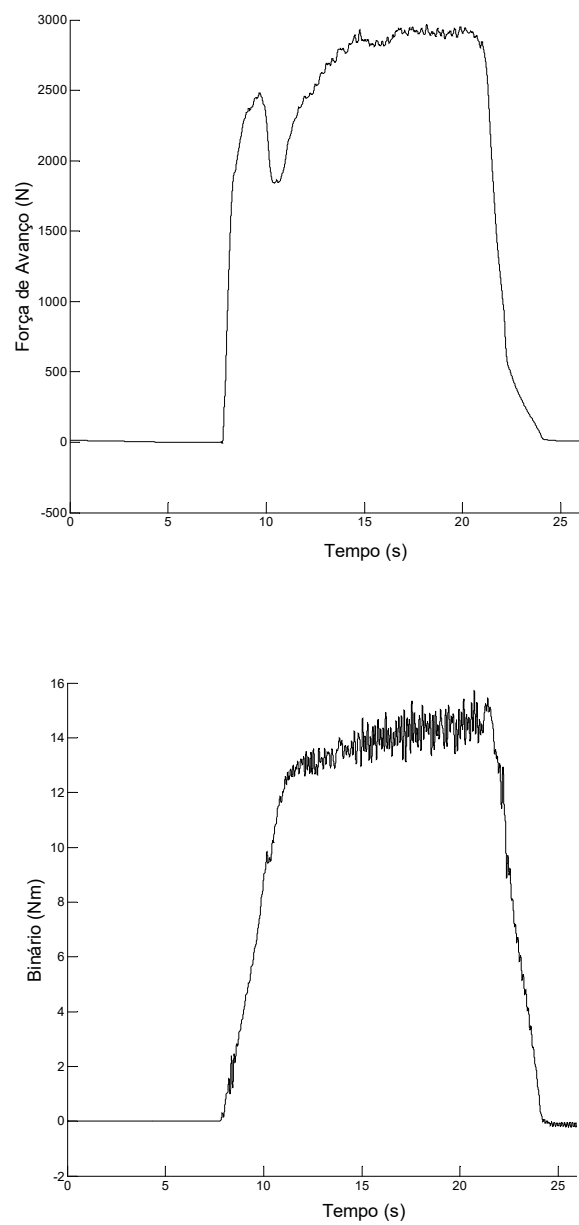


Figura C. 24 - Força de avanço e binário na broca 14.6 (furo a cheio)

Construção do sensor de binário

